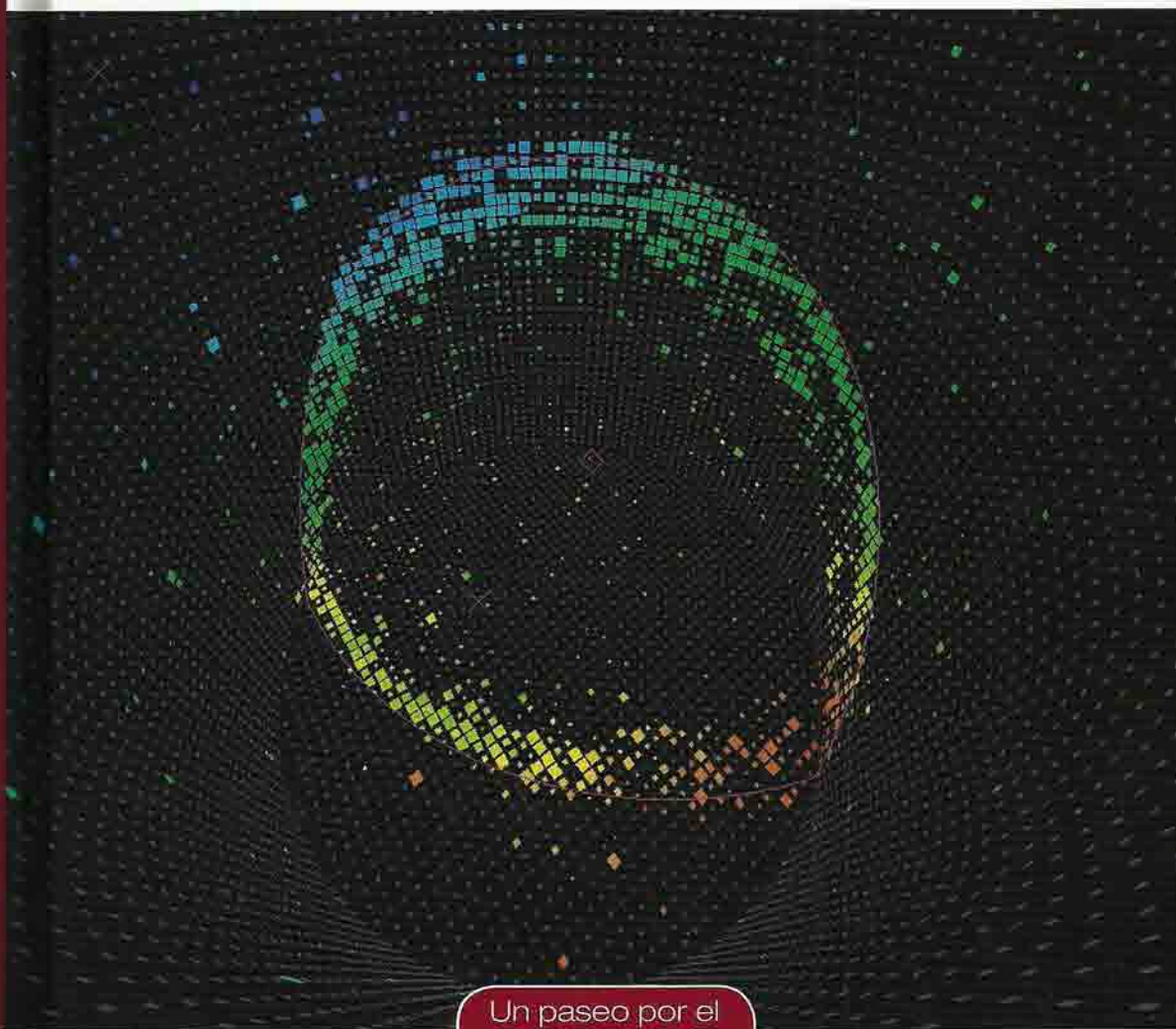


Los neutrinos

Las partículas elementales
que todo lo atraviesan



Un paseo por el
COSMOS

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor y La Comunidad

Redigitalización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmourea.blogspot.com/>

Los neutrinos

Las partículas elementales
que todo lo atraviesan

RBA

Imagen de cubierta: El gráfico muestra la detección de un neutrino por parte del SuperKamiokande, el gran detector de estas partículas situado en Japón.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Juan Antonio Caballero Carretero por el texto
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.
© 2015, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/A. Angelich–NASA/ESA
Hubble Space Telescope (luz visible)–The NASA Chandra X-Ray
Observatory (rayos X): 131b; Anglo-Australian Observatory: 131a;
Archivo RBA: 27b; Atomic Heritage Foundation: 51; Tomasz
Barszczak: portada; Biblioteca del Congreso de EE UU: 27a; Jean-
Luc Caron/CERN: 129; Comisión Reguladora Nuclear de EE UU:
109; Cortesía del Brookhaven National Laboratory: 81; CERN: 92;
GettyImages: 53; IceCube Collaboration: 143; Kamioka Observatory,
ICRR, Universidad de Tokio: 114-115; Sven Lidstrom, IceCube/NSF:
142-143; François Montanet, CNRS/IN2P3 y UJF para Antares: 140;
T2K Collaboration: 111.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de
esta publicación puede ser reproducida, almacenada
o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-8307-8

Depósito legal: B 19604-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - Printed in Spain

SUMARIO

| | |
|-----------------------|--|
| INTRODUCCIÓN | 7 |
| CAPÍTULO 1 | El postulado del neutrino: un remedio desesperado 15 |
| CAPÍTULO 2 | El neutrino se hace real 41 |
| CAPÍTULO 3 | Mirando en el centro del Sol 61 |
| CAPÍTULO 4 | El sabor y otras extrañas propiedades 83 |
| CAPÍTULO 5 | Cambios de personalidad: las oscilaciones 101 |
| CAPÍTULO 6 | El mensajero del universo 123 |
| LECTURAS RECOMENDADAS | 147 |
| ÍNDICE | 149 |

En uno de los episodios de la conocida serie *The Big Bang Theory*, uno de los protagonistas, Sheldon, le propone a su compañero de piso, Leonard, un nuevo juego de física llamado «no veo, no veo». Se trata de la antítesis del famoso juego: «veo, veo», pero incorporando el fascinante mundo de las partículas subatómicas. La adivinanza propuesta por Sheldon es: «no veo, no veo algo que pasa a través de nosotros». La respuesta de Leonard introduce al protagonista de este libro, el neutrino, y le permite ganar el juego con el consiguiente enfado de Sheldon. Desde que usted comenzó a leer este libro, miles de billones (millones de millones) de neutrinos han atravesado su cuerpo sin que se haya percatado del más mínimo efecto. Es natural que pueda mostrarse reacio a admitir tal hecho, pero recuerde que tampoco «ve» las ondas de radio y, sin embargo, simplemente dándole a un interruptor puede escuchar su programa favorito. Lo que podemos ver no es más que una pequeñísima fracción de lo que nos ofrece el mundo natural. Afortunadamente, hemos aprendido a «mirar» con otros «ojos», y de esta forma, apreciar muchas maravillas que la naturaleza nos tenía reservadas, y muchas más que iremos descubriendo en los años venideros.

En el caso de los neutrinos, no sabemos qué nos impresiona más, si el número de los mismos (una cifra ciertamente mareante y difícil de imaginar), o su casi absoluta imperceptibilidad. ¿Cómo es posible que millones de millones estén pasando a través de nuestros cuerpos cada segundo y no notemos nada? ¿Cómo podemos estar seguros de que realmente existen y se producen en tales cantidades? ¿Qué propiedades tienen? ¿Por qué es importante su presencia? ¿Para qué sirven? Seguramente el lector se estará realizando estas y otras muchas preguntas que resultan completamente pertinentes. Comenzamos aquí un breve viaje por la física de los últimos cien años, un viaje que le mostrará una nueva forma de «mirar» el mundo natural para desentrañar sus secretos. De este modo, podrá apreciar cómo surgió la idea del neutrino, cómo se hizo real y cómo fuimos aprendiendo a conocer sus propiedades, al mismo tiempo que los neutrinos mismos nos ayudaban a entender la estructura del universo.

Otro dato que quizá le inquiete es saber si podríamos hacer algo para evitar ser «atravesados» por tan ingente número de proyectiles. La respuesta es no. Los neutrinos nos han acompañado siempre y han formado parte de la propia evolución del mundo natural. Posiblemente, ellos han sido los responsables en gran medida de la propia evolución y, en definitiva, de que en estos momentos nos encontremos aquí, aventurándonos en este viaje al corazón de la materia, y al mismo tiempo, a las regiones más remotas del universo. Los neutrinos que atraviesan su cuerpo proceden de muy diversos lugares. La mayoría han nacido en el Sol, y tras un viaje de unos ocho minutos aproximadamente han llegado a usted. Otros proceden de mucho más lejos, de regiones remotas del universo donde se produjeron en grandes explosiones. Estos también atraviesan su cuerpo después de miles o cientos de miles de años desde que nacieron. Se encontrará asimismo sometido al bombardeo de neutrinos procedentes del propio planeta en el que habita. Por último, por si aún tuviese alguna duda, su propio cuerpo produce neutrinos. ¿Cómo evitarlos pues?

El neutrino, nuestro protagonista, está íntimamente ligado a uno de los descubrimientos que más sorprendieron a los físicos a finales del siglo XIX, la radiactividad. Tuvieron que pasar mu-

chos años para que dicho fenómeno pudiese ser entendido, y ello solo fue posible gracias al desarrollo de una nueva visión del mundo natural, la proporcionada por la teoría cuántica. La necesidad de entender qué sucedía realmente en uno de los tipos de procesos radiactivos conocidos en la época, la denominada desintegración β , condujo al neutrino. Fue una idea que surgió en la mente de uno de los físicos más prominentes de aquellos años, Wolfgang Pauli, un físico conocido por su implacable crítica y por sus cáusticos comentarios sobre muchos de los trabajos de sus colegas. Quizá por dicha razón, necesitó más de tres años para atreverse él mismo a dar a conocer su idea. En sus propias palabras, un remedio desesperado para entender la desintegración β preservando la «sacrosanta» ley de conservación de la energía. Surgió así la hipótesis del neutrino, una nueva partícula subatómica, sin carga eléctrica, con momento angular $1/2$ (al igual que el electrón y el protón), con masa muy pequeña (del orden de la del electrón o menor), y que prácticamente no interactuaba con nada. Es fácil entender las reticencias de Pauli: no solo se veía obligado a introducir una nueva partícula en el mundo de la física, en una época en la que solo se conocían el electrón y el protón, y en la que la mayoría de los físicos perseguían la máxima simplicidad (el sueño de los filósofos), sino que además tenía que admitir la práctica imposibilidad de su detección. Indudablemente, si la idea de postular la existencia de una nueva partícula «invisible» como remedio desesperado para explicar un proceso natural hubiese surgido en la mente de cualquier colega de Pauli, este habría sometido tal teoría a su implacable juicio.

El neutrino comenzó su andadura como una hipotética nueva partícula a finales de 1930. Durante los años siguientes los éxitos y los fracasos irían de la mano. Por una parte, el físico italiano Enrico Fermi incorporó al neutrino como ingrediente esencial en su teoría de la desintegración β , una teoría capaz de explicar con gran éxito todas las evidencias experimentales. Al mismo tiempo, otros físicos pusieron claramente de manifiesto el carácter extremadamente esquivo del neutrino: podía viajar millones de kilómetros atravesando planetas enteros sin que nada le

perturbase. La conclusión parecía clara, no existía ningún modo posible, en la práctica, de observarlo, por lo que el neutrino no parecía ser más que la descabellada idea de un físico teórico que nunca podría tener corroboración experimental. El futuro del neutrino se mostraba bastante desalentador.

No obstante, los físicos no son personas que den fácilmente su brazo a torcer. El ser humano agudiza su ingenio frente a las adversidades. Al fin y al cabo, la dificultad en la detección de los neutrinos no era sinónimo de imposibilidad, y este convencimiento llevó tanto a los físicos teóricos como a los experimentales a un ímprobo esfuerzo para «capturar» la elusiva partícula. Finalmente, en 1956, veintiséis años después del postulado de Pauli, Clyde Cowan y Fred Reines pudieron afirmar, sin lugar a dudas, que aquel tenía razón: el neutrino había sido por fin «observado». A partir de ese momento, nuevos experimentos mostraron cada vez con más claridad y mayor precisión el comportamiento de estas nuevas partículas, un comportamiento que produjo en la comunidad de físicos un estado de gran confusión y, al mismo tiempo, de profunda excitación. Las propiedades de los neutrinos no dejaban de ofrecer sorpresas completamente inesperadas.

Hasta mediados de la década de 1950, coincidiendo con la detección experimental de los neutrinos, la mayoría de los físicos estaban plenamente convencidos de que las leyes naturales debían respetar algunos principios básicos. Así, cualquier proceso natural solo podría tener lugar si la energía, la carga eléctrica y el momento angular se conservaban estrictamente. Lo mismo debía suceder con la conservación de la paridad, una propiedad que implica inversión espacial. En otras palabras, las leyes naturales no deben presentar ninguna preferencia especial por la derecha o la izquierda; ambas direcciones son igualmente probables. Esta era la opinión generalizada entre los físicos hasta que dos jóvenes, T.D. Lee y C.N. Yang, mostraron que tal afirmación no se sostenía. Al contrario, todos aquellos procesos en los que intervenían los neutrinos parecían indicar que tal preferencia por izquierda o derecha realmente existía. Por alguna razón, el neutrino solo se encontraba en su estado «levógiro» (zurdo). Se denominó de esta forma al hecho de que la proyección del espín del neutrino

era siempre opuesta a la dirección de su movimiento. No existían neutrinos «dextrógiros». En otras palabras, los neutrinos parecían distinguir claramente entre ambas direcciones, izquierda y derecha. La situación inversa sucedía en el caso de los antineutrinos (sus antipartículas). La violación de la paridad dejó perplejos a muchos físicos, entre ellos a Pauli, quien no pudo reprimirse de enviar un telegrama informando sobre la «triste» y «penosa» defunción de nuestra amada «paridad». Sin embargo, las sorpresas no habían terminado. Aún había más, mucho más.

La sorprendente intuición de un brillante físico teórico italiano que había emigrado a la Unión Soviética, junto al exquisito trabajo de un reducido grupo de jóvenes físicos experimentales, mostraron que el neutrino no era solo una partícula, sino tres (en un principio solo se consideraron dos). El neutrino mostraba tres personalidades diferentes que podían ponerse claramente de manifiesto por los distintos procesos en los que intervenían. Los físicos introdujeron un nuevo término, el «sabor», para referirse a esta nueva y sorprendente propiedad que estaba asociada íntimamente con las otras partículas que siempre acompañaban al neutrino. Así se introdujo el sabor electrónico para aquellos neutrinos que solo surgían junto al electrón, y el sabor muónico para el caso de los muones, unas partículas que se descubrieron a mediados de la década de 1930 y que en todos los aspectos eran idénticas a los electrones, salvo en su masa (aproximadamente 200 veces más pesadas). Por último, se introdujo el sabor «tau» para indicar los neutrinos asociados a los «tauones», partículas como el electrón pero con una masa 3500 veces superior. La introducción del concepto de sabor, con la diferenciación entre los tres tipos de neutrinos, fue un hito enorme en la formulación del denominado *modelo estándar*, el mejor marco matemático y conceptual de que disponemos en la actualidad para explicar el comportamiento del mundo subatómico.

Los sorprendentes descubrimientos señalados en los párrafos previos estuvieron siempre acompañados por el trabajo sobre los neutrinos solares. El Sol es el principal generador de los neutrinos que atraviesan la Tierra. Así pues, uno de los problemas que se plantearon desde el principio fue intentar detectarlos.

Para ello era imprescindible controlar dos aspectos esenciales. Por una parte, debía disponerse de un sistema fiable de detección de neutrinos. Por otra, se necesitaba estimar el ritmo de producción de neutrinos en el Sol. Solo de este modo podrían compararse las predicciones teóricas con las evidencias experimentales, poniendo de manifiesto la consistencia o inconsistencia del estudio realizado. El trabajo, llevado a cabo por el físico experimental Ray Davis y el teórico John Bahcall, produjo resultados completamente incomprensibles que solo pudieron encontrar respuesta algunas décadas más tarde, y que dieron lugar al denominado problema (o déficit) de los neutrinos solares. Durante muchos años la comunidad desconfió de las mediciones y/o predicciones de Davis y Bahcall. A este último se le llegó a conocer como «el físico que no supo calcular el flujo de neutrinos del Sol». Sin embargo, los años pusieron a cada cual en su lugar, y no solo hubo de admitirse que Davis y Bahcall estaban en lo cierto desde los primeros momentos, sino que la explicación del problema de los neutrinos solares introdujo una nueva propiedad aún más sorprendente que todo lo que se había ido descubriendo en años previos. No solo se trataba de que el neutrino mostrase tres personalidades diversas (los tres sabores), sino que, además, parecía existir en el propio neutrino un verdadero problema de identidad. En otras palabras, el sabor no parecía ser una propiedad inmutable, y el neutrino tenía la capacidad de cambiar de sabor. Para ello, era necesario que los neutrinos tuviesen masa (por pequeña que fuese) y que hubiesen recorrido una distancia suficientemente larga. En tales circunstancias, un neutrino que hubiese nacido con el sabor electrónico (se hubiese creado junto a un electrón) podía cambiar a otro sabor distinto, es decir, podía adquirir una nueva personalidad. Este es el fundamento del fenómeno de las oscilaciones de los neutrinos, y la razón por la cual Davis siempre detectó una fracción de los neutrinos electrónicos que, de acuerdo con la teoría de Bahcall, se producían en el Sol. Ni los cálculos ni el experimento estuvieron nunca equivocados; la raíz del problema siempre estuvo en la propia naturaleza del esquivo neutrino y su posible «trastorno» de identidad.

La historia de los neutrinos es la historia de la física moderna, es la historia de algunos físicos teóricos y experimentales que dedicaron prácticamente toda su vida a «descubrir» y «atrapar» a esta esquivia partícula. Una historia de éxitos y fracasos, de geniales intuiciones y, sobre todo, de enorme perseverancia. Una historia que, finalmente, premió a quien supo esperar, aunque quizá no a todos. Los neutrinos nos han acompañado todos estos años, y su estudio se ha convertido en uno de los temas más impactantes de la física actual. En los últimos años se han realizado avances sorprendentes en su conocimiento, pero estoy convencido de que aún nos depararán nuevas e inesperadas sorpresas. Hemos descubierto su extraña personalidad con sus cambios de identidad, cada día sabemos algo más sobre sus masas, hemos conseguido detectar su presencia incluso cuando proceden de los lugares más lejanos del universo. Por último, quizá consigamos descubrir en el futuro cuál es la verdadera relación entre el propio neutrino y su antipartícula (el antineutrino). No deja de ser sorprendente que la partícula más esquivia del universo sea quizá la que nos proporcione la mejor información sobre el universo en el que vivimos. El tiempo lo dirá.

El postulado del neutrino: un remedio desesperado

El neutrino surgió en la mente de Wolfgang Pauli como un remedio desesperado para explicar el espectro energético correspondiente al proceso de desintegración beta (β), preservando así el principio de conservación de la energía. No fue una idea libre de polémica: no solo se trataba de «inventar» una nueva partícula, sino que, además, se reconocía que sería imposible detectarla.

A finales del siglo XIX nadie podía prever los cambios que se avecinaban en la física y la consiguiente descripción del mundo natural. En el transcurso de unos años la naturaleza se reveló a través de experimentos «incomprensibles», y fue necesario desarrollar una nueva física, un nuevo lenguaje con el que describir el comportamiento del mundo natural a escala microscópica. Es en este contexto en el que surgió el fenómeno de la *radiactividad* y el «desesperado» intento de los físicos por explicar lo que la naturaleza les mostraba en el caso de la *desintegración β* . Fueron unos años en los que no hubo más remedio que «arriesgarse» con nuevas y originales ideas, aunque pudiesen parecer «absurdas» para otros físicos. La sensación que existía era que estaba surgiendo algo completamente nuevo, y en muchos aspectos, radicalmente distinto a lo que se conocía. ¿Cómo moverse por este nuevo mundo cuando los propios principios de la física clásica empezaban a tambalearse? El neutrino surgió así, como una bonita pero descabellada idea de un físico teórico. Algo que, en palabras del propio físico creador de la idea, nunca podría tener corroboración experimental.

EL FIN DE UNA ÉPOCA

William Thomson (1824-1907), más conocido como lord Kelvin, uno de los físicos más prominentes de la historia, y sin duda alguna, la personalidad más destacada de la física de Gran Bretaña durante toda la segunda mitad del siglo XIX, anunció en 1900: «En estos momentos no existe nada nuevo por descubrir en física. Lo único que se presenta ante nuestros ojos es realizar experimentos cada vez más precisos». Ese mismo año, Max Planck (1858-1947) dio a conocer su trabajo sobre la *radiación del cuerpo negro*. Un trabajo que marcó el comienzo en una nueva visión del mundo natural, una visión completamente inesperada y muy distinta a la clásica conocida hasta entonces. Tampoco supo apreciar lord Kelvin la verdadera importancia de algunos experimentos que se habían realizado algunos años antes, y cuya descripción solo fue posible cuando se hubo desarrollado la nueva *teoría cuántica*. Lord Kelvin, el físico de referencia en la época, era dado a realizar afirmaciones rotundas que, aunque en su mayoría fueron correctas, en algunas ocasiones resultaron completamente erróneas.

Lo verdaderamente interesante de la afirmación de Kelvin es que muestra el panorama general de la física a finales del siglo XIX. En esos años, se consideraba a la física como una ciencia perfectamente estructurada y con un poder descriptivo sin par. La física estaba construida sobre dos grandes pilares, la *mecánica de Newton* y el *electromagnetismo de Maxwell*, que habían hecho posible la descripción de la práctica totalidad de fenómenos naturales. Nunca antes se había visto un avance tan espectacular en la ciencia, lo cual tuvo un enorme impacto en la propia sociedad. La física del siglo XIX podía describir perfectamente el movimiento de los cuerpos en la Tierra y en el espacio. Todo tipo de fenómenos ópticos, eléctricos y magnéticos tenían claro acomodo en la teoría de Maxwell. La teoría estadística vio un desarrollo espectacular y sus técnicas pudieron aplicarse directamente a los conceptos de la *termodinámica*. El propio conocimiento sobre la estructura interna de la materia era cada vez más profundo gracias al desarrollo de la teoría atómica y al

consiguiente avance espectacular de la química. Efectivamente, la afirmación de lord Kelvin no parecía muy disparatada.

Sin embargo, los físicos de la época eran también conscientes de la existencia de una clara contradicción entre la teoría de la mecánica de Newton y la teoría electromagnética de Maxwell. A ello se unió la incapacidad de la teoría de Maxwell para explicar el famoso problema de la radiación del cuerpo negro. A pesar de todo, existía el convencimiento generalizado de que tales inconsistencias y problemas podrían resolverse con relativa facilidad dentro del esquema general de la física existente en aquellos momentos. Nadie pudo prever que de la inconsistencia entre la mecánica y el electromagnetismo surgiría la *teoría de la relatividad*, y que por otra parte, el problema del cuerpo negro conduciría a una revolución aún mayor, el nacimiento del mundo cuántico con sus extrañas e «impredecibles» leyes. Esta nueva y desconcertante imagen del mundo natural estaba implícita en tres experimentos que tuvieron lugar a finales del siglo XIX. Sin embargo, ¿quién podía pensar en aquel momento que los resultados que nos mostraba la naturaleza solo podrían explicarse con la formulación de una nueva física? El tránsito del siglo XIX al XX supone el paso de la física clásica a la denominada física moderna.

TRES EXPERIMENTOS SORPRENDENTES

Los tres experimentos cuya importancia lord Kelvin no supo apreciar tuvieron lugar en el transcurso de tres años. Realmente, muy pocos físicos fueron conscientes en aquellos años de la importancia capital que dichos experimentos tendrían para el conocimiento de la estructura interna de la materia. En 1895, el físico alemán Wilhelm Röntgen (1845-1923) se encontraba investigando el fenómeno de *fluorescencia* que producían los *rayos catódicos*. Sin embargo, al cubrir el tubo de rayos catódicos para eliminar la luz visible, observó un débil resplandor que desaparecía al cortar la corriente. Röntgen concluyó que al hacer incidir radiación sobre un material se producían unos rayos misteriosos

—de aquí el nombre de *rayos X*— que tenían la propiedad de atravesar materiales sólidos. En aquellos momentos el origen y naturaleza de este nuevo tipo de radiación eran completamente desconocidos. No obstante, este desconocimiento no fue óbice para que se popularizara rápidamente a nivel social, en especial, una vez que Röntgen comenzó a mostrar las imágenes del cuerpo humano que proporcionaban los rayos X. Por primera vez, se podían observar con gran claridad los huesos del organismo, y cualquier fractura de los mismos quedaba claramente reflejada como una sombra en la emulsión fotográfica. El propio Röntgen realizó la primera radiografía de la mano de su mujer. El descubrimiento de los rayos X causó un impacto enorme en la sociedad de la época y su uso comenzó a generalizarse mucho antes de que se entendiese su naturaleza. Röntgen se convirtió en una celebridad y fue galardonado en 1901 con el primer premio Nobel de Física. Hoy día es innecesario mencionar el impacto de los rayos X en nuestras vidas a través de sus aplicaciones en medicina.

A comienzos de 1896 la Academia de Ciencias francesa organizó una reunión para discutir sobre la nueva radiación descubierta por el físico alemán. A dicho encuentro asistió Henri Becquerel (1852-1908), físico francés que llevaba tiempo trabajando en el fenómeno de la *fosforescencia*. Este fenómeno consiste en la capacidad de algunos materiales de emitir radiación (brillar) tras ser expuestos a la luz del Sol. El proceso no parecía muy diferente al estudio que había realizado Röntgen, y por consiguiente, Becquerel se preguntó si las muestras que él estaba analizando podrían emitir también la «desconocida» radiación X. Observó que al dejar al Sol la sustancia fosforescente (un compuesto de potasio, azufre y uranio), esta era capaz de impresionar placas fotográficas, las cuales habían sido convenientemente protegidas de la luz solar. Era incuestionable que las muestras de Becquerel también emitían radiación. Sin embargo, lo más interesante, y el verdadero descubrimiento de Becquerel, sucedió casi por azar. Durante varias semanas el tiempo en París estuvo tan nublado que Becquerel decidió guardar las muestras junto a la emulsión fotográfica en un oscuro

cajón a la espera de que el Sol volviese a brillar. Algunos días después, y cansado de esperar, decidió sacar sus muestras y revelar la placa fotográfica. Lo que observó le dejó anonadado. La placa estaba impresionada y mostraba una silueta de las muestras mucho más nítida que las que había obtenido al realizar el experimento bajo la luz del Sol. Entonces, Becquerel repitió de modo meticuloso el experimento, eliminando la posibilidad de cualquier problema asociado a la calidad de las placas fotográficas. El resultado no dejó lugar a dudas: las muestras emitían de modo natural una desconocida radiación cuya presencia era completamente independiente de la exposición a la luz solar. Becquerel, que denominó a esta radiación *rayos uránicos*, había descubierto la *radiactividad*.

Por último, en 1897, el físico inglés Joseph J. Thomson (1856-1940), trabajando con los rayos catódicos en presencia de *campos eléctricos y magnéticos*, pudo determinar la naturaleza de dichos rayos. Observó que la radiación producida en el *cátodo* sufría una deflexión (en presencia de un imán) equivalente a la que se obtendría en el caso de partículas cargadas negativamente y propagándose a una enorme velocidad. Las cuidadosas mediciones de Thomson le permitieron determinar las propiedades de estas partículas, portadoras de carga eléctrica y constituyentes elementales de la materia. Surgió así el *electrón*, la partícula elemental con la mínima carga eléctrica negativa y con una masa aproximadamente 1800 veces menor que la masa del átomo de hidrógeno. Los electrones eran constituyentes fundamentales de los átomos, pero su contribución a la masa de los mismos era mínima. El descubrimiento de Thomson tuvo una importancia capital en el posterior desarrollo de los modelos atómicos, y consiguientemente, de la propia estructura de la materia.

LA FÍSICA MODERNA

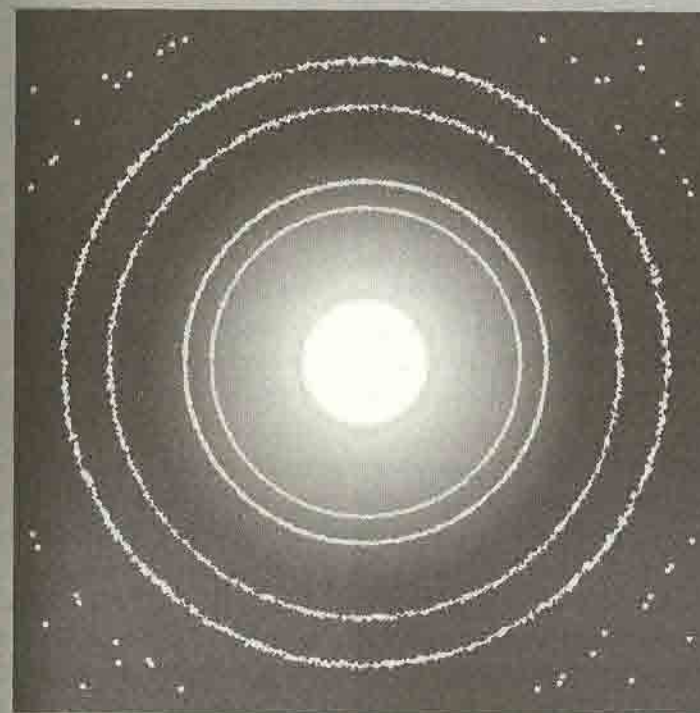
A principios del siglo xx la física sufrió un cambio espectacular con la aparición y desarrollo de dos nuevas teorías que intentaban, por una parte, resolver las inconsistencias existentes entre

las teorías de Newton y Maxwell, y por otra, proporcionar una descripción satisfactoria de lo que sucedía a nivel microscópico. El cambio fue tan profundo que todas las ramas del conocimiento se vieron afectadas. Conceptos tan arraigados como el espacio, el tiempo, la simultaneidad, la masa, la energía, la predictibilidad, la medida de trayectorias, etc., se vieron sacudidos en profundidad. Los físicos tuvieron que admitir que el conocimiento de la estructura más interna de la materia, así como la propia descripción del comportamiento del universo, solo eran posibles haciendo uso de una visión del mundo natural radicalmente diferente a la que proporcionaba la física clásica y profundamente alejada de todo aquello que se había considerado el «sentido común».

Surgieron así la teoría de la relatividad y la teoría cuántica. En el primer caso, se trató básicamente de la obra de un solo físico, Albert Einstein (1879-1955), quien en 1905, el denominado *annus mirabilis* de la física, publicó el trabajo titulado «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento», más conocido como *teoría especial de la relatividad*. Diez años después, en 1915, Einstein extendió su estudio a sistemas no inerciales completando la denominada *teoría general de la relatividad*, una nueva concepción sobre las leyes generales de la gravitación y la íntima relación entre la geometría del *espacio-tiempo* y la densidad de materia. La teoría especial de la relatividad resuelve la inconsistencia que existía entre la mecánica de Newton y el electromagnetismo de Maxwell eliminando toda referencia al *éter* y la posible existencia de un sistema de referencia absoluto. La teoría especial de la relatividad se construye a partir de dos postulados fundamentales: 1) el principio de relatividad; todas las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas de referencia inerciales, y 2) el principio de la constancia de la velocidad de la luz; la velocidad de la luz en el vacío es siempre la misma independientemente del sistema de referencia inercial considerado. Un resultado esencial de la teoría de la relatividad, que tuvo un impacto enorme en la descripción del mundo microscópico, fue el denominado *principio de equivalencia masa-energía*. Masa y energía son propiedades

DUALIDAD ONDA-CORPÚSCULO

Un episodio capital en estos años fue la denominada *dualidad onda-corpúsculo*. El comportamiento corpuscular y el ondulatorio eran complementarios, y ambas propiedades resultaban imprescindibles para describir el mundo a nivel microscópico. La necesidad de considerar la luz como un chorro de fotones para explicar el *efecto fotoeléctrico* no era incompatible con el carácter ondulatorio de la misma, necesario para explicar el *fenómeno de interferencia*. Ambos caracteres, corpuscular y ondulatorio, aparecen íntimamente ligados en la expresión matemática introducida por el físico francés Louis de Broglie (1892-1987): $\lambda = h/mv$, donde λ es la longitud de onda, propiedad ligada con el carácter ondulatorio, y mv , la cantidad de movimiento dado por el producto de la masa por la velocidad de las partículas, ambos conceptos directamente relacionados con el carácter corpuscular de la materia, siendo h la constante de Planck. La dualidad onda-partícula se vio completamente reafirmada con los experimentos de difracción de electrones en los que aparece un patrón evidente de interferencia, efecto claramente relacionado con el carácter ondulatorio (véase la figura). La teoría de De Broglie también se consideró como el germen de la posterior formulación ondulatoria de la mecánica cuántica desarrollada por Erwin Schrödinger.



Espectro de difracción de electrones. Los anillos que se observan corresponden a los máximos y mínimos de interferencia.

íntimamente ligadas: la energía puede transformarse en masa, es decir, pueden crearse partículas si existe energía suficiente, y a la inversa, las partículas pueden aniquilarse (desaparecer) dando lugar a energía.

Al contrario de la relatividad, el desarrollo de la teoría cuántica necesitó del trabajo y cooperación de numerosos físicos. En 1900 Max Planck dio a conocer su trabajo sobre la radiación del cuerpo negro, en el cual tuvo que aceptar, por primera vez, la idea de que la energía solo se emitía y/o absorbía en múltiplos enteros de una cantidad límite. Planck no pudo prever, ni siquiera pudo aceptar, todas las implicaciones que surgieron a partir de su «idea». Durante los años siguientes, varios físicos ahondaron en las consecuencias de la *cuantización* de la energía. El propio Einstein generalizó el principio de Planck, considerando que la misma *radiación electromagnética* estaba constituida por paquetes o cuantos independientes de energía. Einstein aplicó esta visión de la radiación al conocido problema del efecto fotoeléctrico proporcionando una descripción excelente de todas las evidencias experimentales. El trabajo, que se publicó en 1905, al mismo tiempo que la teoría de la relatividad, resultó muy difícil de aceptar para otros físicos de la época, pero fue la razón por la cual Einstein fue galardonado con el premio Nobel en 1921.

El periodo comprendido entre 1900 y 1925 corresponde al desarrollo de la denominada *vieja teoría cuántica*. Durante estos años, las nuevas ideas introducidas por Planck y Einstein se fueron incorporando a través de «reglas» elaboradas *ex profeso*, y cuyo objetivo fundamental era describir de modo razonable las numerosas evidencias experimentales que surgían cada día. En muchos casos, estas *reglas* eran simplemente introducidas *ad hoc*, sin ninguna justificación más allá de su necesidad para explicar los experimentos. De este modo, la teoría adolecía en gran medida de falta de consistencia y de coherencia interna. A pesar de ello, la vieja teoría cuántica tuvo un éxito espectacular. Proporcionaba una descripción satisfactoria de ciertas propiedades del mundo subatómico, algo completamente impensable en el contexto de la física clásica.

A partir de 1925 el progreso de la teoría cuántica dio un vuelco espectacular gracias al trabajo desarrollado por un reducido grupo de jóvenes físicos. En el escaso periodo de dos años surgió una nueva teoría, la *mecánica cuántica*, capaz de explicar las más diversas evidencias experimentales, y además, construida a partir de principios y postulados perfectamente establecidos. La teoría cuántica se erige como una teoría física perfectamente consistente, coherente y capaz de describir el comportamiento del mundo subatómico. Sin embargo, la nueva teoría implicaba cambios muy profundos en los conceptos más arraigados en la física clásica. La mecánica cuántica parecía desmontar de raíz muchos de los principios que se consideraban «pilares básicos» de la ciencia. Aunque el éxito espectacular de esta *extraña* visión del mundo físico condujo a que la mayoría de los físicos la aceptasen, algunas de sus implicaciones no pudieron ser admitidas por insignes físicos que, además, habían tenido un papel estelar en el desarrollo de la vieja teoría cuántica, como fue el caso de Einstein, o de la misma mecánica cuántica, como Erwing Schrödinger (1887-1961). En los años posteriores el máximo esfuerzo se centró en intentar describir la interacción entre la radiación y la materia. Esto requería aunar la relatividad y la mecánica cuántica en un solo marco coherente. Fueron años de enorme frustración para muchos físicos debido a las innumerables dificultades que surgieron. No obstante, el esfuerzo y la perseverancia tuvieron su recompensa y muchos años después comenzaron a desarrollarse las denominadas *teorías cuánticas de campos*, una historia que trasciende los límites de este libro.

LA RADIATIVIDAD

Becquerel no pudo conocer ni el origen ni la naturaleza de la nueva radiación que había descubierto. El primer estudio exhaustivo del nuevo fenómeno correspondió al matrimonio formado por Pierre Curie (1859-1906) y Marie Curie (1867-1934). Ellos fueron quienes introdujeron el término *radiactividad*.

LA ESTRUCTURA DE LOS ÁTOMOS

Tras el descubrimiento del electrón por Joseph J. Thomson en 1897, surgió inmediatamente la necesidad de encontrar una descripción de la estructura atómica. En este contexto, uno de los papeles estelares correspondió a Ernest Rutherford (1871-1937), quien, a través de los famosos experimentos de dispersión que realizó entre 1911 y 1912, pudo concluir que la práctica totalidad de la masa del átomo se hallaba concentrada en una mínima porción del mismo, a la cual se denominó *núcleo atómico*. Surgió así el denominado *modelo planetario del átomo* (figura 1), modelo que no incorporaba ninguna de las nuevas propiedades cuánticas introducidas en los años previos. El modelo de Rutherford era insostenible (el átomo resultaba inestable) y muy poco tiempo después fue modificado por Niels Bohr (1885-1962) incorporando sus dos famosas postulados:

1. La existencia de los estados estacionarios en los que el electrón no emite energía y cuyo momento angular orbital está cuantizado.

2. La estimación de la energía liberada al pasar un electrón de una órbita a otra: $\Delta E = h\nu$, donde ν es la frecuencia de la radiación, y h , la constante introducida por Planck.

El primer modelo cuántico del hidrógeno

El modelo de Bohr (figura 2) fue el primer modelo cuántico del átomo de hidrógeno, y su éxito fue incuestionable. Permitió explicar algunos resultados, como la *serie de Balmer*, cuya justificación hasta ese momento había sido simple numerología. Bohr introdujo en su modelo órbitas electrónicas esféricas caracterizadas por un número cuántico entero relacionado con la cuantización del momento angular. Posteriormente, Arnold Sommerfeld (1868-1951) extendió el modelo de Bohr permitiendo órbitas elípticas e incorporando en la descripción del mismo la teoría especial de la relatividad. El modelo de Sommerfeld supuso la inclusión de un segundo número cuántico (posteriormente, hubo de introducirse un tercero al incluir en el modelo todos los grados de libertad espaciales), y además, predijo el desdoblamiento de determinados niveles energéticos y el valor de la denominada *constante de estructura fina*:

$$\alpha = \frac{e^2}{hc}$$

Ambas predicciones fueron rápidamente confirmadas por los experimentos.

Llega el espín

Finalmente, la irrupción del espín, una nueva propiedad cuántica sin conexión alguna con el mundo clásico, y sobre todo, el desarrollo de la mecánica cuántica, proporcionaron un marco sólido y coherente con el que describir la compleja estructura de la materia. Este aspecto resultaba esencial para entender el propio fenómeno de la radiactividad, y consiguientemente, comprender cómo surgió el neutrino.

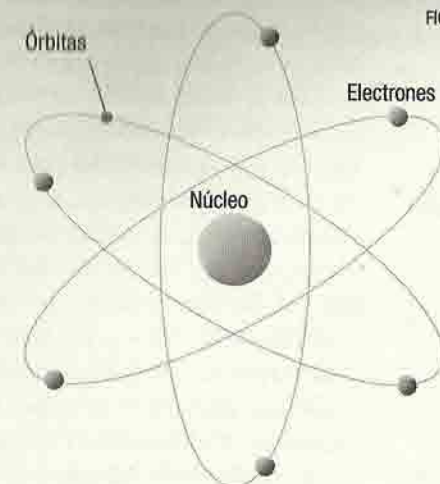


FIG. 1

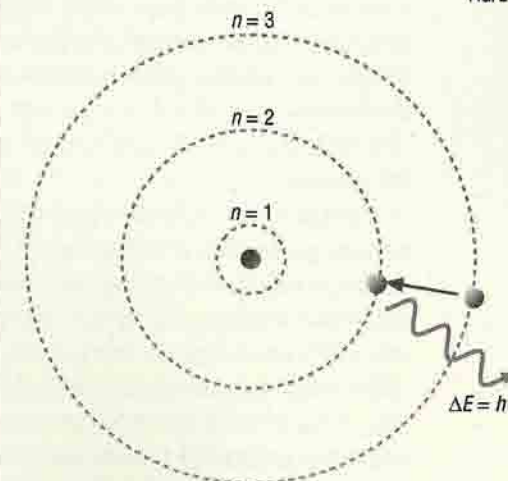


FIG. 2

Arriba, retrato de Ernest Rutherford junto a la estructura del átomo desarrollada por él. Abajo, Niels Bohr y su modelo atómico con las órbitas circulares cuantizadas.

Pierre y Marie Curie analizaron en detalle las muestras que producían la radiación llegando a determinar con precisión los elementos químicos responsables de la misma. De este modo comprobaron que la radiactividad era independiente del compuesto químico en que aparecía el elemento radiactivo. Más aún, lograron identificar, aparte del uranio, nuevos elementos, desconocidos hasta entonces, que emitían mucha más radiación. Este fue el caso del polonio (símbolo químico Po), denominado así en referencia al país de origen de Marie Curie, y especialmente, del radio (Ra), un elemento químico cuya radiactividad es aproximadamente un millón de veces más intensa que la del uranio. El descubrimiento de estos nuevos elementos radiactivos permitió a M. Curie estudiar con mayor profundidad la propia naturaleza de la radiación emitida. El laboratorio de los Curie contenía una gran cantidad de sustancias radiactivas con las cuales se trabajaba sin ninguna protección. Eran años donde no se conocían los posibles efectos que la radiactividad podía producir sobre el organismo humano. De hecho, la radiactividad alcanzó una gran popularidad, como había sucedido años antes con los rayos X, y algunas de las sustancias radiactivas llegaron a usarse alegremente en determinados medicamentos. Años después, Marie Curie sufrió los estragos físicos producidos por la enorme cantidad de radiación a la que había estado expuesta.

El siguiente capítulo en el estudio de la radiactividad lo escribió un joven físico experimental de origen neozelandés, y cuyo nombre, Ernest Rutherford, quedaría indisolublemente unido no solo al fenómeno de la radiactividad sino también al corazón de la materia, el núcleo atómico. Rutherford era un físico experimental enormemente brillante que además tenía la facultad de analizar los problemas de un modo muy directo y claro. Siempre intentaba encontrar una justificación, una explicación a los resultados experimentales que obtenía. No solo descubrió nuevos e inesperados hechos de la naturaleza sino que proporcionó además respuestas y modelos que «intentaban» justificar el porqué de dichos resultados. Con los años se comprobó que muchas de las explicaciones de Rutherford eran demasiado

«simplistas» para ser correctas, pero quizá ahí estuvo el verdadero valor de su atrevimiento. Sus experimentos y consiguientes explicaciones se adelantaron muchos años a la mecánica cuántica, la teoría que permitió comenzar a vislumbrar y «entender» el comportamiento del mundo subatómico.

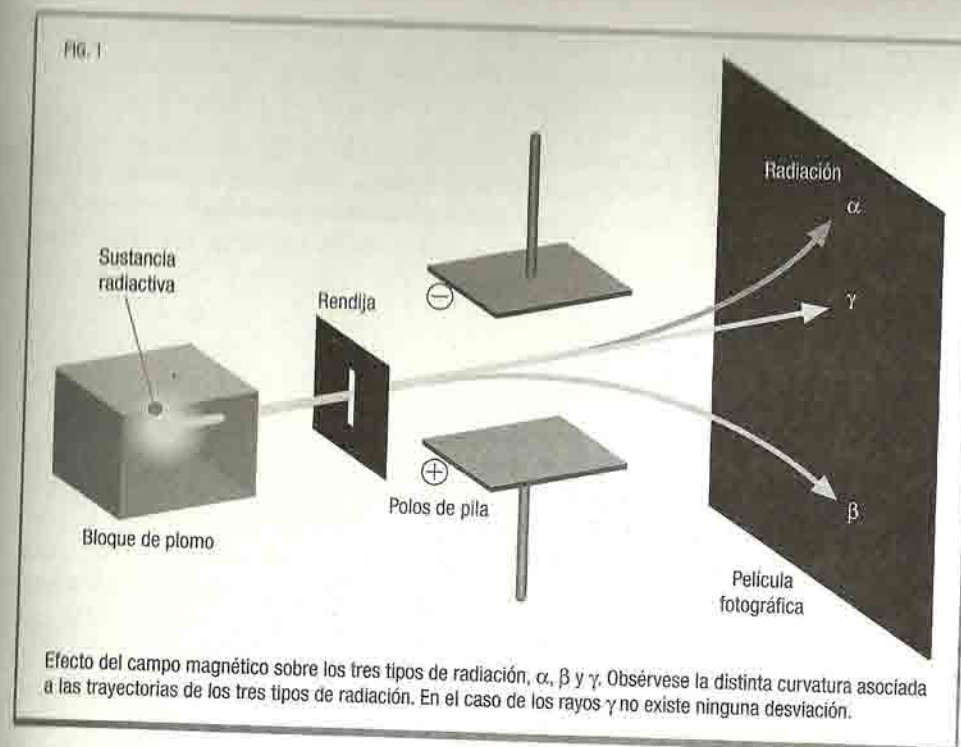
Rutherford realizó experimentos con distintas muestras radiactivas determinando el alcance de la radiación, y la capacidad que tenía la misma para atravesar determinados materiales. De este modo, pudo comprobar que existían distintos tipos de radiación. Mientras que, en ciertos casos, los rayos prácticamente se detenían con una simple lámina muy fina de aluminio, en otros, por el contrario, la radiación seguía propagándose después de atravesar numerosas láminas dispuestas consecutivamente. Un paso decisivo para determinar la verdadera naturaleza de la radiación fue situar las muestras radiactivas en el interior de una cámara de «niebla» sometida a campos magnéticos. Este estudio lo realizó en colaboración con su ayudante Charles Wilson (1869-1959). La radiación emitida por la sustancia producía la ionización de los átomos de la cámara dejando una traza de su trayectoria. De este modo, Rutherford y Wilson observaron que en algunos casos las trazas eran gruesas mientras que en otros se mostraban mucho más finas. Además, al estar sometidas al campo magnético, en los dos casos se observaba que las trazas se curvaban en sentidos opuestos aunque con una curvatura muy distinta. Ello implicaba que ambos rayos estaban constituidos por partículas cargadas eléctricamente. Sin embargo, para una de las radiaciones se trataba de partículas negativas y muy ligeras (fueron identificadas como los electrones descubiertos por Thomson en 1897), y para la otra consistía en partículas con carga positiva y mucho más pesadas. Algún tiempo después se identificaron como núcleos de helio, es decir, núcleos constituidos por dos protones y dos neutrones.

Durante toda mi vida, los nuevos espectáculos de la naturaleza me hicieron disfrutar como un niño. Fue como un nuevo mundo abierto para mí, que finalmente se me permitió conocer con toda libertad.

MARIE CURIE

Recuérdese que en aquellos años aún no se habían descubierto los neutrones. De hecho, se consideraba que los núcleos atómicos, que serían descubiertos algunos años después por el propio Rutherford, estaban formados por electrones y protones. Los nombres que Rutherford introdujo para denominar ambas radiaciones fueron: 1) *radiación alfa* (α -núcleos de helio), y 2) *radiación beta* (β -electrones). Para finalizar, algún tiempo después se descubrió un tercer tipo de radiación que no dejaba trazas en la cámara de niebla ni sufría ninguna deflexión en presencia del campo magnético. Se la denominó *radiación gamma* (γ), y se identificó con la emisión de fotones, es decir, radiación electromagnética (figura 1).

La determinación de los tres tipos de radiactividad supuso un gran avance; sin embargo, aún persistía sin esclarecer una pregunta fundamental: ¿por qué determinados elementos emiten radiación de forma espontánea, sin necesidad de ninguna estimulación externa? El átomo era un sistema complejo en el que aparecían dos estructuras muy diferenciadas. Por una parte, los electrones situados en los *orbitales atómicos* que determinaban las propiedades químicas de los elementos, por otra, los núcleos atómicos responsables del fenómeno de la radiactividad. Es importante mencionar que los primeros estudios sobre la radiactividad fueron simultáneos a los primeros intentos por descubrir la estructura de los átomos. Por consiguiente, hay que ser conscientes de que en determinadas afirmaciones, la secuencia temporal puede resultar algo engañosa. En cualquier caso, en el fenómeno de la radiactividad lo que sucedía es que un determinado núcleo atómico se transformaba en otro distinto más estable. En dicho proceso, el núcleo se desprendía de energía en forma de radiación, pero ¿de dónde procedía dicha energía? La respuesta la había proporcionado Einstein en 1905 en su teoría especial de la relatividad: la equivalencia masa-energía. Al transformarse un núcleo en otro distinto más estable, es decir, con menor masa, esta diferencia de masas, completamente equivalente a energía, se emitía simplemente como radiación electromagnética (fotones) o como partículas (electrones y núcleos de helio). La famosa ecuación de Ein-



stein, $E = mc^2$, permitía determinar con precisión la cantidad de energía emitida en cada caso. Al menos, esto es lo que todos los físicos esperaban.

LA DESINTEGRACIÓN β Y EL ESPÍN NUCLEAR

Lo que se esperaba fue lo que se encontró en el caso de la radiación α y γ . La energía de los rayos coincidía exactamente con la diferencia de masas (energías) entre los sistemas nucleares inicial y final. Sin embargo, la situación fue muy distinta con la radiación β . En 1914 el físico británico James Chadwick (1891-1974) mostró que el espectro energético de emisión de la radiación β era continuo. Esto significaba que los electrones eran emitidos con energías muy distintas. Este resultado fue com-

LA LEY DE LA DESINTEGRACIÓN RADIACTIVA Y OTROS CONCEPTOS DE INTERÉS

En 1902 Rutherford y su ayudante Frederick Soddy (1877-1950) informaron de que la velocidad de desintegración de una muestra radiactiva, es decir, el número de núcleos por unidad de tiempo que se desintegran, era proporcional al número de núcleos existentes en cada momento. La constante de proporcionalidad solo dependía de la muestra radiactiva y determinaba la probabilidad de que un núcleo determinado se desintegrara transcurrido un cierto tiempo. Es importante mencionar que hablamos de probabilidad y no de certeza. No podemos saber en qué momento preciso tendrá lugar la desintegración de un núcleo, pero sí puede estimarse la probabilidad de que tal proceso ocurra. La ley de Rutherford y Soddy mostraba que para una muestra radiactiva con miles/millones de núcleos radiactivos, el número de estos disminuía de modo exponencial, en la forma:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t},$$

donde $N(t)$ es el número de núcleos que quedan transcurrido un cierto tiempo t , N_0 es el número de núcleos existentes en el momento inicial, y λ es la constante de desintegración cuyo significado físico es la probabilidad por unidad de tiempo de que un núcleo se desintegre. Esta constante depende únicamente de la sustancia radiactiva considerada. Un concepto que resulta muy útil es el de actividad, representado por el término A . La actividad es la velocidad de desintegración de la muestra radiactiva, es decir, cuántos núcleos se desintegran por unidad de tiempo. Así pues, cuanto mayor sea la actividad de una sustancia, tanto más radiactiva será. Al igual que la expresión exponencial previa para el número de núcleos, la actividad también disminuye de forma exponencial con el tiempo: $A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$, donde A_0 representa la actividad inicial de la muestra.

El periodo de semidesintegración

En las figuras 1 y 2 se muestra el comportamiento típico de la desintegración radiactiva. Aparece asimismo el tiempo que debe transcurrir para que el número de núcleos radiactivos presentes inicialmente se haya reducido a la mitad (análogamente para que la actividad radiactiva de la muestra se reduzca a la mitad). Puede comprobarse fácilmente que este tiempo viene dado por la expresión:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

Se denomina *semivida* o *periodo de semidesintegración*. Los valores de la semivida pueden ser muy variados, desde segundos hasta miles de millones de años. Algunos ejemplos representativos son: radón-222 (3,82 días), cobalto-60 (5,27 años), radio-226 (1.600 años), carbono-14 (5.730 años) y uranio-238 (4.510 millones de años). Para finalizar, las unidades más usadas para medir la velocidad de desintegración de una sustancia radiactiva son el *becquerel* (o *becquerelio*), representado por Bq, que corresponde a una desintegración por segundo, y el *curio*, denotado como Ci, que equivale a $3,7 \cdot 10^{10}$ desintegraciones por segundo (becquerelios). Este valor corresponde aproximadamente a la actividad de 1 gramo de radio-226.

FIG. 1

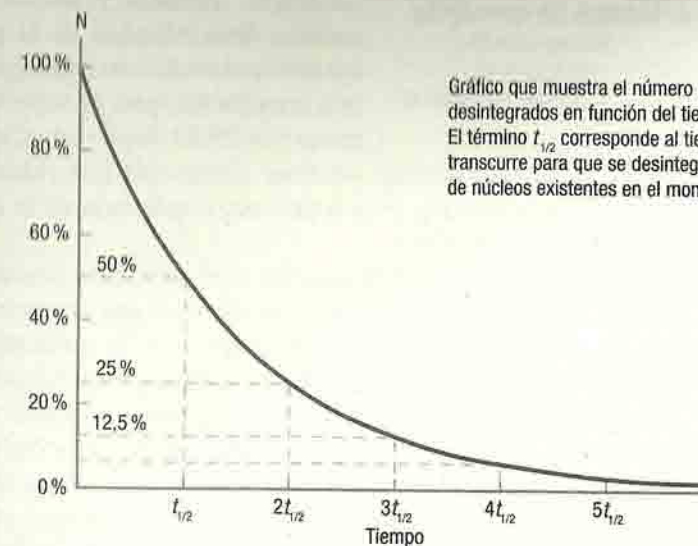


Gráfico que muestra el número de núcleos desintegrados en función del tiempo. El término $t_{1/2}$ corresponde al tiempo que transcurre para que se desintegren la mitad de núcleos existentes en el momento inicial.

FIG. 2

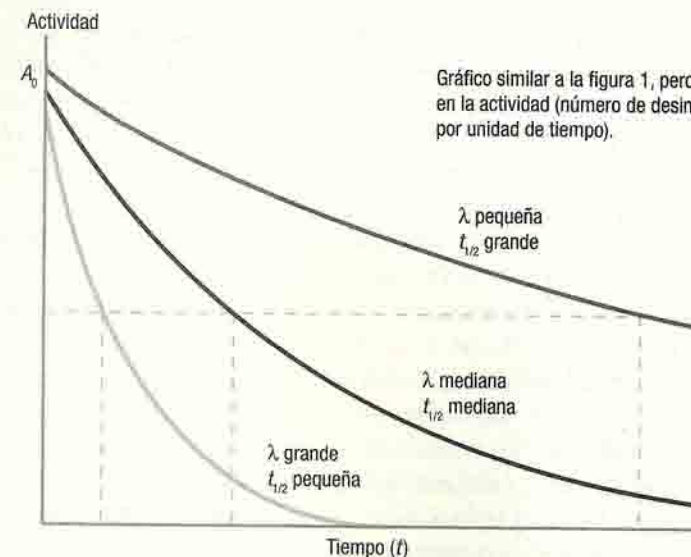


Gráfico similar a la figura 1, pero centrado en la actividad (número de desintegraciones por unidad de tiempo).

Toda la física es imposible o trivial. Es imposible hasta que la entiendes, y entonces se convierte en trivial.

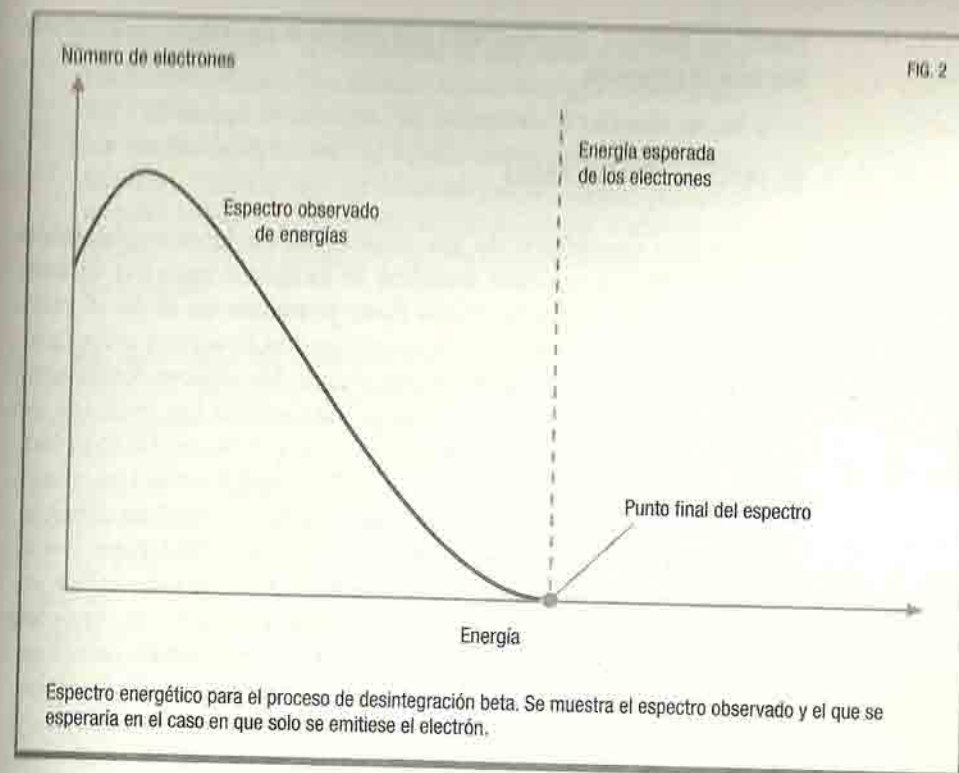
ERNEST RUTHERFORD

(figura 2). ¿Cómo podían emitirse electrones con valores muy diversos de la energía, y en todo caso por debajo de la que teóricamente se esperaba?

En la década de 1920 se produjo una profunda discusión sobre los posibles mecanismos responsables del proceso de desintegración. La situación del problema con la radiación β fue claramente expuesta por el físico Wolfgang Pauli (1900-1958) muchos años después, en 1957: «El espectro continuo energético de rayos β , descubierto por Chadwick en 1914, trajo consigo de forma inmediata serias dificultades en su interpretación teórica. ¿Estaba dicho resultado relacionado directamente con los electrones primarios emitidos por el núcleo radiactivo, o con procesos secundarios?». A finales de la década de 1920, a través de diversos experimentos, la mayoría de los físicos se convenció de que el espectro continuo de energías correspondía directamente a los electrones primarios, es decir, aquellos electrones que intervenían directamente en el proceso radiactivo. Así pues, el problema seguía persistiendo aún con más fuerza.

La segunda dificultad que se planteó estaba relacionada con la nueva propiedad de *espín* introducida en 1925, pero que solo pudo ser formalizada de modo coherente tras la publicación de la *ecuación cuántica relativista de Dirac* en 1928. El espín era una propiedad intrínseca de las partículas subatómicas, y por consiguiente, de los propios núcleos atómicos. Además, en aquellos años se desarrollaron técnicas experimentales para determinar de modo bastante preciso su valor. El problema que surgió entonces fue la inconsistencia en algunos casos entre el *espín nuclear*, el *momento magnético* y la *estadística de los núcleos*. El ejemplo paradigmático fue el caso del nitrógeno. Como ya se ha mencionado, en aquellos años el modelo aceptado por

pletamente inesperado y condujo a una gran confusión. Si los estados nucleares iniciales y finales tenían valores determinados de la energía, los electrones debían asimismo tener una energía fija, y no el espectro continuo que había observado Chadwick



la mayoría de los físicos era considerar los núcleos atómicos constituidos por protones y electrones. En 1928 se determinó el momento angular del núcleo de nitrógeno, resultando ser 1. Esta evidencia era a todas luces inconsistente con una estructura de dicho núcleo constituida por 14 protones y 7 electrones. Tanto los protones como los electrones son partículas de *espín semientero*, y las leyes de la teoría cuántica indicaban que un núcleo formado por un número total impar de partículas (electrones + protones) debía dar lugar a un espín nuclear resultante semientero, en clara contradicción con las evidencias experimentales. Así pues, existían dos graves dificultades con el proceso de desintegración β , ambas íntimamente relacionadas con la propia estructura del núcleo atómico. Es en esta disyuntiva y situación de profunda confusión en la que surge el postulado de

Pauli, un intento desesperado por resolver de modo simultáneo los dos problemas.

EL POSTULADO DE PAULI

El espectro energético de los electrones en la desintegración β fue uno de los grandes desafíos de la época para los físicos. Algunos, como el mismo Niels Bohr, pusieron en duda el principio de *conservación de la energía* en los procesos atómicos. La conservación de la energía era uno de los pilares fundamentales de la física, y por tanto, la posición de Bohr fue criticada en los términos más duros por algunos de sus colegas. En realidad, Bohr admitía que la conservación de la energía en los procesos atómicos (desintegración β) solo se satisfacía estadísticamente. Por el contrario, para otros físicos, entre ellos Wolfgang Pauli, la ley de conservación de la energía era estrictamente válida en cada proceso individual. Así pues, Bohr explicaba el espectro continuo de energía simplemente como un resultado estadístico global resultante de la desintegración β de miles de núcleos. Por el contrario, si la energía debía conservarse estrictamente en cada una de las desintegraciones, ¿cómo explicar que los electrones se emitiesen con cualquier valor de la energía? La única respuesta que encontró Pauli fue admitir que junto al electrón se emitía otra partícula, no detectada, de modo que la energía total disponible se repartía entre ambas. Esta fue la hipótesis de Pauli; un desesperado intento por encontrar una explicación plausible al extraño espectro descubierto por Chadwick (figura 3).

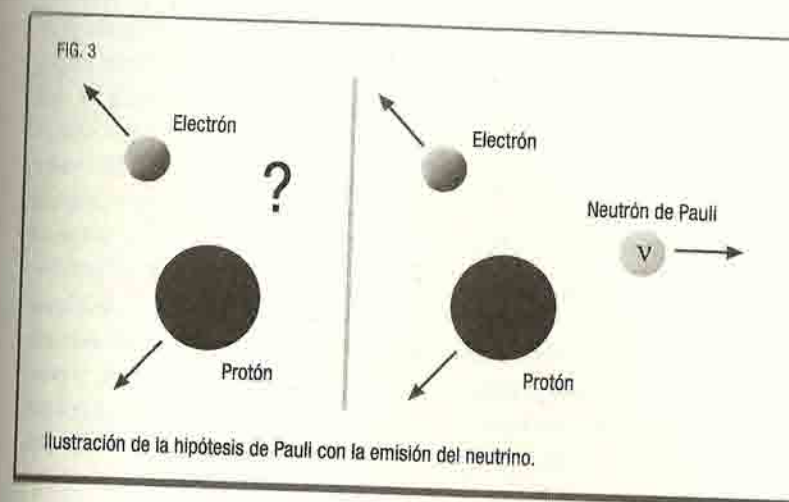
Pauli comunicó sus ideas en algunas cartas dirigidas a sus colegas más cercanos. Sin embargo, el 4 de diciembre de 1930 envió una carta abierta a los físicos participantes en un congreso científico sobre radiactividad que tuvo lugar en Tubinga (Alemania). En la misma decía:

Estimados Sres. y Sras. radiactivos:

En relación a la estadística de los núcleos de N y Li y del espectro continuo de la radiación β , he llegado a un reme-

dio desesperado... la posibilidad de que existan en el núcleo partículas neutras, que llamaré *neutrones*, que tienen espín $1/2$ y obedecen el principio de exclusión... La masa de estos neutrones debe ser del mismo orden que la masa electrónica... Admito que mi remedio puede parecer bastante incierto puesto que, de existir, los neutrones probablemente deberían haberse detectado ya. Pero quien «nada arriesga, nada gana».

Pauli introdujo su nueva partícula neutra como un nuevo constituyente del núcleo atómico, el cual estaría constituido por tres partículas: el protón (el más pesado y con carga positiva), el electrón (ligero y con carga negativa) y el nuevo *neutrón* (también ligero y sin carga eléctrica). La hipótesis de Pauli pretendía resolver simultáneamente las dos grandes dificultades que existían en aquellos momentos: 1) explicar el espectro energético continuo en el proceso de desintegración β , y 2) describir los valores del momento magnético, espín y estadística de los núcleos atómicos. La imagen del núcleo proporcionada por Pauli implicaba determinar qué fuerzas eran responsables de mantener ligados los tres constituyentes en el seno nuclear. Pauli se convenció en muy poco tiempo de que la imagen de su nueva



partícula como constituyente de los núcleos atómicos era insostenible. Así pues, el *neutrón* de Pauli no existía en el núcleo pero sí se emitía en la desintegración β . Durante meses Pauli continuó elaborando su hipótesis pero mostrando siempre una gran cautela respecto a su validez. En el verano de 1931, durante su primera visita al continente americano, Pauli habló públicamente por primera vez sobre su teoría del neutrón. Aunque no se atrevió a que su charla fuese impresa, la noticia apareció en *The New York Times* en los siguientes términos: «Un nuevo habitante en el corazón del átomo fue introducido hoy en el mundo de la física cuando el Dr. W. Pauli, del Instituto Politécnico de Zúrich, postuló la existencia de partículas o entidades que él ha bautizado con el nombre de neutrones». Finalizada su estancia americana, Pauli participó en Roma en un congreso internacional sobre física nuclear, en el que conoció al físico italiano Enrico Fermi (1901-1954). Este se mostró desde el primer momento entusiasmado con la idea de Pauli, mostrando por el contrario un claro rechazo a la visión de Bohr y la no conservación de la energía.

En 1932 Chadwick, el mismo físico que había obtenido el espectro energético del decaimiento β , descubrió el neutrón como nuevo constituyente básico del núcleo atómico. Esta partícula era muy distinta a la que había introducido previamente Pauli. Aunque no presentaba carga eléctrica, su masa era muy similar a la del protón, es decir, mucho más pesada que la propuesta por Pauli. El descubrimiento del neutrón tuvo una importancia capital en la comprensión de la estructura nuclear. Al contrario del modelo previo, la nueva teoría consideraba como únicos constituyentes de los núcleos a los protones y neutrones. De este modo, tanto el espín como la estadística de los diversos núcleos atómicos podían describirse de modo satisfactorio. Al mismo tiempo, esta nueva imagen del núcleo implicaba que en el proceso de desintegración β tanto los electrones como las hipotéticas partículas de Pauli eran creados en el mismo proceso de decaimiento. La *realidad* del neutrón fue aceptada rápidamente, y por consiguiente, hubo de buscarse un nuevo nombre para referirse a la partícula de Pauli. Fue Fermi quien la denominó *neutrino* (el pequeño neutrón).

Finalmente, transcurridos casi tres años desde su idea original, Pauli decidió publicar su primer trabajo sobre el neutrino en los *proceedings* de la famosa conferencia Solvay que tuvo lugar en Bruselas en octubre de 1933. En dicha reunión se presentaron también nuevas evidencias experimentales que mostraron de modo claro que la imagen de Bohr, con la no conservación de la energía, era errónea. Además, se propuso por primera vez la imagen de los neutrinos como partículas neutras con masa intrínseca nula (al igual que los fotones). El siguiente capítulo en la historia del neutrino fue debido a Enrico Fermi. Este, en un renombrado trabajo, consiguió que algunos físicos comenzasen a dejar de lado sus reticencias y aceptasen la existencia de la nueva partícula como una hipótesis plausible y correcta.

El neutrino se hace real

El neutrino parecía una simple conjetura de un brillante físico teórico que permitía mantener el principio de conservación de la energía. Pero aun siendo esto muy importante, era necesario encontrar un modo en que la fantasmal partícula se pudiese en evidencia. Este fue el objetivo durante los siguientes veinticinco años.

Desde la primera conferencia Solvay celebrada en 1911, estos eventos se habían hecho famosos por sus acaloradas discusiones y las conclusiones e ideas que surgieron de los mismos. Eran encuentros donde solo se invitaba a los físicos más renombrados, no más allá de 20-25, para que discutiesen y analizasen en profundidad un tema de interés. Durante el mes de octubre de 1933 tuvo lugar la VII edición de dichas conferencias, y el tema elegido fue el de la *física nuclear*. Esta elección supuso un cambio respecto al proyecto original: aplicación de la mecánica cuántica a la química. Es fácil entender la decisión de los organizadores. El año 1932 fue conocido como el *annus mirabilis* de la física nuclear. En dicho año Chadwick descubrió el neutrón como nuevo constituyente del núcleo atómico, y Carl David Anderson detectó por primera vez el electrón positivo, el *positrón*, la primera evidencia de las antipartículas que surgían del análisis de la ecuación cuántica relativista del electrón desarrollada por el físico inglés Paul Dirac. El mismo año 1933, Frédéric Joliot e Irène Joliot-Curie (hija de Marie Curie) descubrieron el fenómeno de la *radiactividad artificial* y observaron que la desintegración beta podía dar lugar no solo a electrones sino también a

sus antipartículas, los positrones. Todos estos descubrimientos fueron discutidos en profundidad durante la conferencia Solvay, especialmente por tres de los asistentes al congreso: Bohr, Pauli y Fermi. Estas discusiones condujeron a Fermi a intentar lo más difícil aún, desarrollar una teoría que explicase el proceso de desintegración beta y describiese satisfactoriamente todas las evidencias experimentales.

FERMI Y LA DESINTEGRACIÓN BETA

Uno de los resultados experimentales que se presentó durante la conferencia Solvay de 1933 fue el espectro energético de la desintegración beta medido con una gran precisión. El interés era determinar dicho espectro en la zona de valores máximos de la energía del electrón. La razón era simple. Si la energía solo se conservaba de modo estadístico, como defendía Bohr, la distribución energética se debía extender de modo continuo y sin fin. Por el contrario, si realmente se emitía el neutrino introducido por Pauli, el espectro tendría que mostrar un corte abrupto para cierto valor de la energía (véase la figura 2 del capítulo 1). Este corte indicaría que existía otra partícula que se llevaba el resto de la energía. Las evidencias experimentales eran muy claras: existía un manifiesto límite superior en el espectro energético de electrones. Pauli tenía razón, y así pudo hacer público su postulado, añadiendo además que la masa del neutrino podría incluso ser compatible con un valor prácticamente nulo.

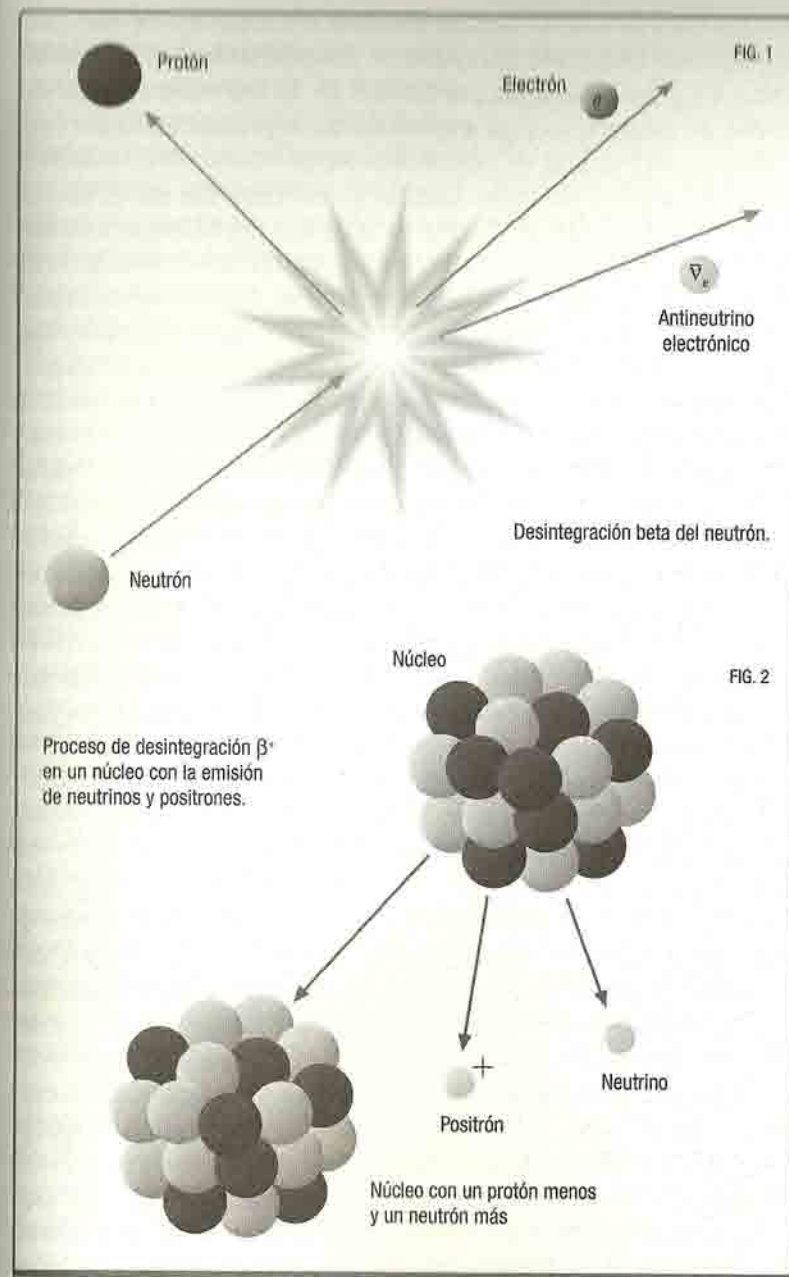
La reivindicación del postulado de Pauli fue el punto de partida en la teoría de Fermi. Este comenzó identificando claramente a los protagonistas del proceso: protones, neutrones, electrones, positrones y los elusivos neutrinos. Además, se percató de una clara simetría que podía establecer entre protones y neutrones, partículas similares en masa pero una con carga eléctrica (protón) y la otra neutra (neutrón). Concluyó que existía una simetría similar entre los electrones (o positrones) y los neutrinos. En este caso se trataba de partículas mucho más ligeras, y también, unas con carga eléctrica y las otras (neutrinos) neutras.

Fermi concluyó que el proceso de desintegración beta consistía básicamente en la transformación de un neutrón en un protón con la consiguiente emisión del electrón y el neutrino (figura 1). La emisión del electrón era necesaria para que la carga eléctrica se conservase. Por el contrario, la presencia del neutrino era imprescindible para que el momento angular también pudiese conservarse. En aquellos años ya se conocía que el espín del neutrón era semientero, al igual que el del protón y el del electrón. Las reglas de acoplamiento del momento angular mostraban claramente que el neutrón solo podría transformarse en un número impar de partículas con espín semientero. Así pues, era necesario que un nuevo *fermión* (este es el nombre que se adjudicó a todas las partículas de espín semientero) acompañase a la pareja protón-electrón. Por otra parte, la simetría encontrada por Fermi le permitió explicar también de modo natural el proceso por el cual era el protón (en el seno de un núcleo atómico) el que podía transformarse directamente en neutrón, positrón y neutrino (figura 2). El proceso satisfacía todas las leyes de conservación necesarias y su descripción no era muy distinta a la desintegración beta normal. De este modo, Fermi proporcionó por primera vez una imagen coherente para el proceso β^+ (producción de positrones a partir del decaimiento de los protones en los núcleos atómicos) descubierto ese mismo año por el matrimonio Joliot-Curie. La imagen de Fermi resultó de inestimable ayuda para comenzar a visualizar el proceso de desintegración radiactiva; sin embargo, ¿cómo tenía lugar?, ¿por qué se producía? Estas eran preguntas que aún necesitaban una respuesta. Y este fue el siguiente paso en la contribución de Fermi.

En el año 1933 algunos físicos, Dirac, Jordan, Heisenberg, el mismo Pauli, habían realizado diversos estudios sobre la interacción entre la radiación y la materia. Aunque surgieron numerosos problemas que solo pudieron resolverse muchos años después, con el desarrollo de la moderna teoría cuántica de la interacción electromagnética, la conocida *electrodinámica cuántica*, lo cierto es que en 1933 ya se habían puesto los cimientos para explicar la íntima relación entre la radiación y la materia. Así, se habían explicado procesos que difícilmente podían describirse por la

mecánica cuántica, y en los cuales ciertos átomos podían emitir radiación electromagnética y, al mismo tiempo, podían absorber radiación. En el primer caso aparecía radiación, es decir, se creaban fotones; en el segundo sucedía lo contrario, desaparecían los fotones. Fermi consideró que estos procesos no podían ser muy diferentes a la producción de la radiación beta. Por consiguiente, describió el decaimiento β como un proceso en el que se creaban el protón, el electrón y el neutrino en el estado final. Estas partículas no pre-existían en los núcleos atómicos, se originaban en el propio proceso de desintegración. En el esquema de Fermi, en un momento determinado el neutrón se transformaba de modo espontáneo en un protón, un electrón y un neutrino. Este proceso tenía lugar en un punto determinado del espacio, es decir, de acuerdo con la imagen de Fermi, las cuatro partículas involucradas en él ocupaban la misma posición en un instante determinado (figura 1). La desintegración del protón (en el núcleo atómico) en un neutrón, un positrón y un neutrino, sucedía de modo similar. Posteriormente, los protones y/o neutrones permanecían en el núcleo atómico debido a la intensa fuerza existente entre ellos (se denomina *interacción fuerte* y es la responsable de mantener unidos a todos los protones y neutrones en el seno de los núcleos atómicos), mientras que los electrones, positrones y neutrinos eran emitidos dando lugar a la radiación beta. Obsérvese que la transformación del neutrón en protón, o a la inversa, implicaba una modificación en el número total de protones existentes en el núcleo atómico, lo cual significaba que surgía un nuevo elemento químico (figura 2). Respecto a por qué tenían lugar dichos procesos, la razón era simplemente la búsqueda de la máxima estabilidad. El proceso de decaimiento beta se producía de modo espontáneo porque el sistema nuclear final era más estable, es decir, su masa era menor que la del sistema inicial. La diferencia de masas se emitía en forma de radiación. Esta razón era similar a la que explicaba por qué un átomo excitado decaía en su estado fundamental desprendiéndose de su diferencia de energía a través de la emisión de radiación electromagnética.

La teoría de Fermi no solo proporcionó una primera explicación de cómo tenía lugar el proceso de desintegración beta, sino



que también permitió calcular la forma del espectro de energías del electrón que pudo compararse directamente con los resultados experimentales. La predicción de Fermi estaba perfectamente de acuerdo con el experimento, reproduciendo incluso el corte abrupto que se observaba en un cierto valor máximo de la energía del electrón. La teoría de Fermi fue un éxito rotundo, hasta el extremo de que todavía hoy día se explica en las facultades de física como primera introducción a la teoría de la desintegración beta. Dicha teoría supuso un enorme espaldarazo para la hipótesis de Pauli; sin embargo, aún existía entre muchos físicos una cierta reticencia a admitir la *realidad* del neutrino. Fermi pudo comprobarlo en sus propias carnes cuando envió a publicar su trabajo, titulado «Teoría tentativa de los rayos beta», a la prestigiosa revista científica *Nature*. Los editores rechazaron el artículo por considerar que «contenía especulaciones demasiado alejadas de la realidad como para interesar al lector». El trabajo de Fermi fue finalmente publicado en italiano en la revista *Nuovo Cimento*, y meses después apareció en alemán en *Zeitschrift für Physik*. Nunca fue publicado en inglés. La revista *Nature* admitió cincuenta años más tarde que el episodio del trabajo de Fermi fue uno de los mayores errores cometidos por la revista en toda su historia.

SURGE UNA POSIBILIDAD: BRUNO PONTECORVO

Tras la teoría de Fermi y los posteriores cálculos de Bethe y Peierls (véase el recuadro de las págs. 50-51), el interés por los neutrinos quedó muy difuminado. ¿Qué sentido tenía estudiar una partícula que nunca podría detectarse? Además, en los años siguientes la física se centró casi por completo en actividades directamente relacionadas con el desarrollo de la guerra. El fenómeno de la fisión nuclear con la ingente producción de energía y el desarrollo de nuevos métodos de detección y localización de los aparatos enemigos fueron algunos de los proyectos en los que la mayoría de los físicos se vieron completamente involucrados. Afortunadamente, algunos siguieron pensando de vez en cuando

en el neutrino, intentando idear algún método para su captura. Es en este contexto en el que surge la figura de Bruno Pontecorvo (1913-1993), físico italiano y antiguo estudiante de Enrico Fermi con quien trabajó en la génesis de las ideas que condujeron a la fisión nuclear: subdivisión de núcleos atómicos pesados en otros más ligeros con la liberación de una enorme cantidad de energía.

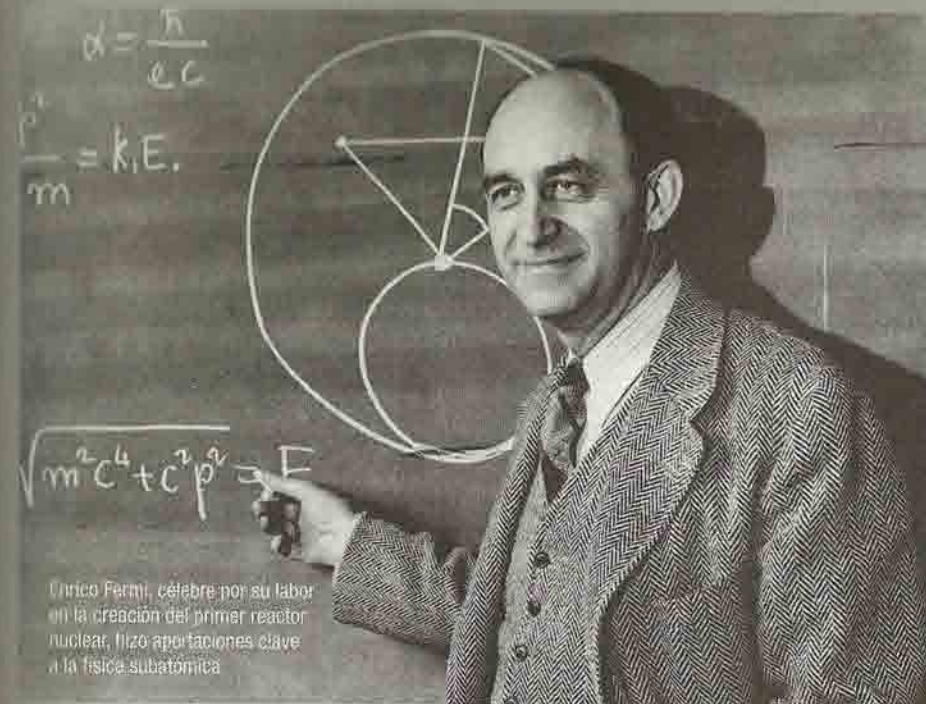
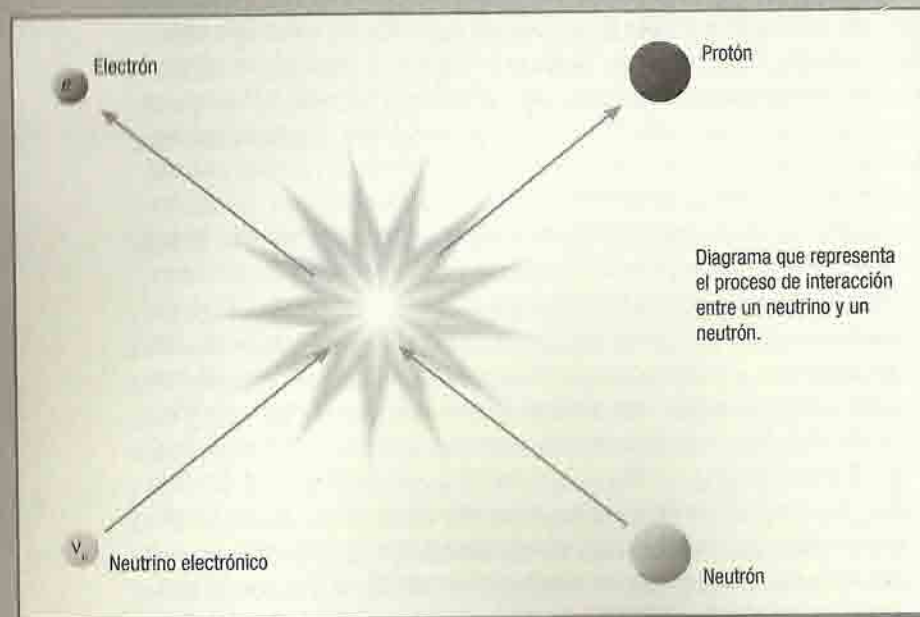
La historia personal de Bruno Pontecorvo es digna de una novela de espías. El lector interesado encontrará detalles en el recuadro que aparece en este capítulo. Desde el punto de vista de la física, el nombre de Pontecorvo estará siempre íntimamente ligado a la historia del neutrino, de su detección y de sus extrañas propiedades. El primer trabajo de Pontecorvo sobre el neutrino apareció publicado en 1946. En el mismo, el físico italiano no solo justificaba que la «observación» del neutrino era posible, sino que además proponía un método para llevar a cabo tal empresa. El artículo de Pontecorvo parecía ser una verdadera carga de profundidad sobre los cálculos de Bethe y Peierls, y consiguientemente, sobre la opinión general que existía en aquellos años. Sin embargo, la idea de Pontecorvo era genial por su simplicidad. Todos los físicos eran conscientes de que resultaba imposible predecir cuándo tendría lugar la desintegración de un núcleo. Asimismo, un neutrino podría atravesar todo el universo conocido sin interactuar con nada. Sin embargo, esta extrema dificultad de interactuar no era sinónimo de imposibilidad. En otras palabras, lo único que habían probado Bethe y Peierls era que el neutrino tenía una probabilidad mínima (despreciable) de interactuar con la materia, pero no que no lo hiciese. Así pues, Pontecorvo propuso que si fuese posible disponer de una *infinitud* (miles de millones) de neutrinos, quizá algunos de ellos podrían interactuar y, por lo tanto, ser «observados». La propuesta de Pontecorvo es similar al juego de la lotería. Si nos fijamos en una sola persona es muy posible que nunca gane el premio; sin embargo, si son miles o cientos de miles las personas

Existen dos posibles desenlaces: si el resultado confirma la hipótesis, entonces has efectuado una medición. Si el resultado es contrario a la hipótesis, entonces has hecho un descubrimiento.

ENRICO FERMI

LA INTERACCIÓN DEL NEUTRINO CON LA MATERIA

La imagen de Fermi de la desintegración beta con sus cuatro protagonistas compartiendo en el mismo instante la misma posición espacial, significaba que al igual que el neutrón se transformaba en protón, electrón y neutrino, también podía tener lugar un proceso en el que un neutrino interactuara (chocara) con un neutrón, produciendo un protón y un electrón (véase la figura). Del mismo modo, el decaimiento del protón en neutrón, positrón y neutrino permitiría también la posibilidad de que el neutrino chocase con el protón, produciendo en el estado final un neutrón y el positrón. Estos procesos se describían en el contexto de la teoría de Fermi de modo completamente similar a las correspondientes desintegraciones. Lo verdaderamente interesante de los nuevos procesos es que el neutrino dejaba de ser algo necesario para explicar la energía que faltaba en la desintegración beta, y se convertía en una partícula activa, portadora de energía y espín, que podía interactuar con otras partículas, produciendo a su vez nuevas partículas que podrían detectarse. Así pues, la presencia del neutrino podría inferirse a partir de los efectos que produce en el mundo subatómico. Esta posibilidad traía consigo un cambio radical en la percepción del neutrino cuya existencia ahora parecía posible poner en evidencia. Para ello, lo único que se necesitaba era estar seguros de que las partículas producidas en el estado final habían surgido debido a la interacción del neutrino. En otras palabras, el neutrino dejaría constancia de su naturaleza por los efectos que su propia existencia produciría en el medio.



¿Se puede detectar el neutrino?

La teoría de Fermi no solo mostró que tales «nuevos» procesos eran posibles, sino que proporcionó asimismo un marco adecuado para calcular la probabilidad que tenía el neutrino de interactuar con la materia adyacente. Estos cálculos fueron realizados por los jóvenes físicos Hans Bethe (1906-2005) y Rudolph Peierls (1907-1995), quizá dos de los físicos teóricos más brillantes de aquellos años. El resultado de los cálculos fue completamente desalentador. La probabilidad era tan pequeña que en la práctica significaba que el neutrino podría atravesar planetas enteros y recorrer millones de kilómetros antes de que interaccionase con alguna otra partícula. Este resultado llevó a Bethe a concluir que «a efectos prácticos, resulta imposible detectar el neutrino». El mismo Pauli se apostó una caja de champán a que nunca podría tenerse constatación experimental de la presencia del neutrino. A pesar del sorprendente e incontestable éxito de la teoría de Fermi, parecía que los editores de *Nature* no habían ido tan descaminados al considerar el artículo de Fermi un trabajo «especulativo en exceso». ¿Quién podía imaginar en aquellos momentos que un reducido grupo de físicos eliminaría de la física de neutrinos el término «imposible»?

que participan en el juego, es probable que algunas de ellas se lleven el gordo. Lo único que debemos hacer es estar preparados para «detectar» a los premiados. Por tanto, un primer aspecto para poder «capturar» al elusivo neutrino era disponer de miles de millones con los que trabajar. Pontecorvo sabía que ninguna muestra natural podía proporcionar tal cantidad de neutrinos, pero su experiencia con las reacciones nucleares y el posterior desarrollo de las bombas y reactores le proporcionó la fuente generadora de neutrinos que necesitaba. Existía pues, una posibilidad que merecía la pena explorar.

El trabajo de Pontecorvo iba mucho más allá de la simple propuesta mencionada en el párrafo previo. De hecho, explicaba el método preciso que permitiría «observar» al neutrino. Pontecorvo hizo uso de la teoría de Fermi, según la cual un neutrino al interactuar con un núcleo daba lugar a un electrón. Para que la carga eléctrica se conservase, lo que sucedía en realidad era que uno de los neutrones de la muestra original se transformaba en un protón. Así pues, el elemento químico original se transformaba en otro distinto con un número atómico incrementado en una unidad (un protón adicional). Pontecorvo era consciente de la imposibilidad de distinguir el electrón producido en la reacción previa entre la infinidad de electrones atómicos existentes en la muestra. Por consiguiente, la única posibilidad de detectar la «existencia» del neutrino era a través del análisis del núcleo resultante. Para ello, este núcleo «hijo» debía verificar dos condiciones esenciales: 1) ser lo más inerte posible para evitar que reaccionase químicamente, y 2) ser moderadamente radiactivo, es decir, con un periodo de semidesintegración lo bastante largo para que se pudiese detectar sin excesiva dificultad. Por último, el material usado para el detector se necesitaría en grandes cantidades, y por consiguiente, debía ser barato. Tras enumerar las condiciones necesarias para proceder, Pontecorvo dio una respuesta concreta a las preguntas planteadas. El material a usar en el detector podría ser simplemente cloro, sustancia muy usada en productos de limpieza. El neutrino al interactuar con el cloro producía argón, un gas noble, químicamente inerte, y radiactivo, con un periodo de semidesintegración de 35 días. Este

BRUNO PONTECORVO

Pontecorvo (1913-1993) fue un físico italiano cuyas ideas y propuestas resultaron esenciales para el desarrollo de la física de neutrinos. Completó sus estudios en la Universidad de Pisa y posteriormente se trasladó a Roma para trabajar en el grupo de Enrico Fermi. Su primer trabajo científico, en colaboración con Fermi, versó sobre los efectos producidos al bombardear núcleos atómicos con neutrones lentos. En él se propusieron las ideas que condujeron al descubrimiento de la fisión nuclear. En 1936 se instaló en París, donde trabajó con el matrimonio Joliot-Curie. En 1940, se trasladó a Estados Unidos. A pesar de su estrecha relación con Fermi y el destacado papel de este en el Proyecto Manhattan, Pontecorvo nunca fue invitado a formar parte del mismo. En 1943 fue contratado en Chalk River (Canadá) para trabajar en la construcción de un reactor nuclear. Durante ese periodo, Pontecorvo comenzó a interesarse por los neutrinos, y en 1946 escribió el famoso artículo en el que explica cómo detectar estas esquivas partículas.



Deserción a la Unión Soviética

Finalizada la guerra, Pontecorvo adquirió la ciudadanía británica y se trasladó al laboratorio Harwell en el Reino Unido. Estos años coinciden con el periodo álgido de la guerra fría. En 1950, tras las vacaciones de verano, la familia Pontecorvo desapareció sin dejar rastro. Cinco años después, Pontecorvo reapareció en la Unión Soviética explicando las razones por las cuales había decidido desertar. Aunque recibió innumerables premios científicos en la Unión Soviética, no le fue permitido salir del país hasta la década de 1980. Siguió trabajando en la física de neutrinos durante el resto de su vida, aunque algunos de sus trabajos no fueron reconocidos en su momento al ser publicados en revistas soviéticas que pasaron desapercibidas en el mundo occidental. Con el paso del tiempo, ha podido comprobarse la verdadera genialidad de sus ideas y el impacto de las mismas en el conocimiento que actualmente tenemos del neutrino. Él fue quien introdujo la idea de diversas clases de neutrinos, una idea capital en el desarrollo del *modelo estándar* de la física de partículas. Asimismo, fue el primero en proponer el posible cambio de personalidad de los neutrinos, el denominado *fenómeno de las oscilaciones de neutrinos*. Un extraño fenómeno que finalmente pudo comprobarse experimentalmente, y que permitió explicar el problema de los *neutrinos solares*, que había traído de cabeza a los físicos durante más de treinta años.

tiempo era más que suficiente para detectar el argón e inferir la presencia del neutrino. Así pues, la propuesta de Pontecorvo era simplemente hacer incidir millones de neutrinos generados por un reactor nuclear sobre un enorme tanque lleno con cientos de toneladas de líquido limpiador (cloro). Con algo de suerte, era probable que se produjesen algunos núcleos radiactivos de argón, un resultado que mostraría de modo incuestionable la interacción del neutrino con el cloro, es decir, la propia existencia del neutrino.

PRIMER INTENTO FALLIDO

Pontecorvo no pudo llevar a cabo el método propuesto. Su vida en los años siguientes fue demasiado complicada. Quien puso a prueba la propuesta del físico italiano fue un químico estadounidense, Ray Davis (1914-2006), quien había trabajado durante los años de guerra en el desarrollo de armas químicas, convirtiéndose en un experto en técnicas de *radioquímica*, la química de elementos radiactivos. Esta experiencia le resultaría fundamental para el proyecto en el que se embarcó a partir de 1948. Ese año, fue contratado en el Laboratorio Nacional de Brookhaven (Nueva York). Allí decidió dar un giro a su vida, intentando encontrar un proyecto de investigación suficientemente interesante y en el cual aún hubiese mucho por hacer. La respuesta a su búsqueda la encontró en la biblioteca del centro, cuando cayó en sus manos el artículo de Pontecorvo. Davis se dio cuenta rápidamente de lo fácil que resultaría llevar a cabo la propuesta del físico italiano. Él era un experto en el análisis de núcleos radiactivos y la detección y separación de los núcleos de argón producidos no suponía ninguna dificultad.

Davis preparó un tanque lleno con unos 4 000 litros de tetracloruro de carbono que situó próximo al pequeño reactor existente en el laboratorio. Transcurrido un cierto tiempo, analizó los resultados obtenidos comprobando que el número de núcleos de argón producidos no era significativo. De hecho, este número era en esencia el mismo independientemente de que el reactor

se encontrase funcionando o estuviese apagado. Así pues, concluyó que los núcleos de argón se debían a los rayos cósmicos (véase el capítulo 4, donde se describe la radiación cósmica) y el flujo de neutrinos producidos por el reactor no parecía tener ninguna influencia en los resultados medidos. A pesar del desaliento que invadió a Davis, este estaba convencido de que tanto la propuesta original de Pontecorvo como su puesta en práctica eran correctas, y por tanto, decidió mejorar el experimento construyendo un detector más grande que trasladó a Savannah River (Carolina del Sur), donde existía un reactor más potente. Además, situó el detector a varios metros de profundidad con el objetivo de protegerlo de la radiación cósmica. Pero los resultados de este nuevo experimento volvieron a ser negativos. No existía ninguna evidencia que pusiese de manifiesto la interacción de los neutrinos con los núcleos de cloro y la consiguiente producción del argón radiactivo.

Es fácil imaginar la sensación de frustración en la que debió sumirse Davis, especialmente al comprobar, algunos meses después, que otros físicos consiguieron «capturar» al elusivo neutrino (tal como se detalla en las páginas siguientes). No obstante, Davis no se dejó vencer por el desaliento y persistió en el estudio de los neutrinos. Su esfuerzo, y sobre todo su perseverancia, tuvieron recompensa muchos años después. Además, el análisis de Davis resultó correcto en todo momento; el proceso de interacción estaba claramente planteado y el método de detección era impecable. Entonces, ¿por qué los resultados fueron negativos? La razón estaba implícita en la propia naturaleza del neutrino. Davis no podía imaginar en aquellos años que las partículas que se producían en el reactor eran antineutrinos, las antipartículas del neutrino, y que existían ciertas propiedades y leyes que hacían imposible que dichos antineutrinos interaccionasen con los núcleos de cloro para producir electrones y núcleos de argón. Ninguna modificación del experimento habría permitido a Davis poner en evidencia al neutrino. Quizá, el aspecto positivo de este trabajo fue mostrar claramente la diferencia entre el comportamiento de neutrinos y antineutrinos, pero ¿quién sabía algo de este tema en aquellos momentos? No sería la única vez en la que

el extraño y «sorprendente» carácter del neutrino jugase una mala pasada a Davis. Algunos años después, la situación volvió a repetirse con el estudio de los neutrinos solares (véase el capítulo 3).

POR FIN, EL NEUTRINO

En 1951 el físico estadounidense Frederick Reines (1918-1998) llegó a la misma conclusión que Davis. Debía existir una forma de «capturar» al esquivo neutrino. Reines había trabajado en el Proyecto Manhattan durante los años de guerra convirtiéndose en un experto en el análisis de los efectos de las explosiones nucleares. Conocía perfectamente las reacciones involucradas en una explosión nuclear, y era del todo consciente de los millones de millones de neutrinos que se producían en la misma. Es posible que, al igual que sucedió con Davis, el trabajo seminal de Pontecorvo le sirviese de inspiración para el proyecto en el que se embarcó en los años siguientes. Sin embargo, al contrario de Davis, Reines tomó un camino distinto. Pontecorvo le convenció de la posibilidad de detectar al neutrino si se disponía de una fuente suficientemente activa, pero el método experimental para poner en evidencia al neutrino sería distinto.

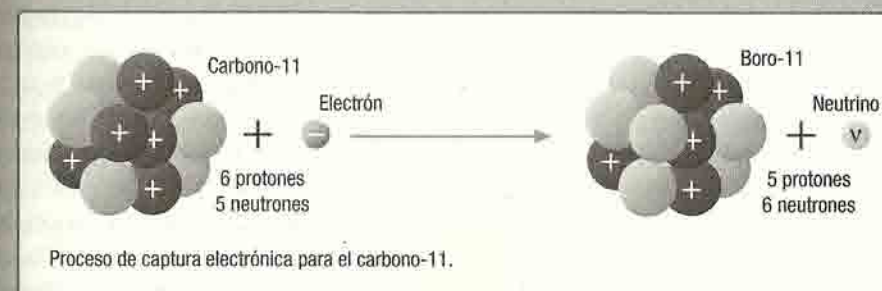
Tras consultar con Fermi, Reines se convenció de que era posible hacer uso de una bomba atómica como fuente generadora de los neutrinos. La experiencia de Reines durante sus años previos le hacía ser optimista en el desarrollo de un detector que «sobreviviese» a la explosión nuclear, y que fuese capaz de atrapar algunos de los neutrinos producidos. Parece difícil de creer que una propuesta de este tipo fuese realizada, sin embargo, no solo fue así, sino que fue rápidamente aceptada por el director del Laboratorio Nacional de Los Álamos. El diseño específico del experimento fue realizado por Reines y su colaborador Clyde Cowan (1919-1974). El uso de una explosión nuclear tenía riesgos evidentes y dificultades muy serias. El detector debía estar suficientemente protegido, y además, debía existir la seguridad de que todo funcionase correctamente, puesto que no se podría

NEUTRINOS Y ANTINEUTRINOS

La teoría cuántica relativista desarrollada por Dirac trajo consigo la idea de que para cada partícula existía su correspondiente antipartícula con la misma masa y carga eléctrica opuesta. Este fue el caso del electrón y su antipartícula, el positrón. La cuestión es: ¿qué propiedad permite distinguir al neutrino de su correspondiente antipartícula, el antineutrino? En este caso se trata de partículas sin carga eléctrica y con masas prácticamente nulas. Así pues, en un proceso de desintegración beta, ¿qué partícula se emite junto al electrón, el neutrino o el antineutrino? ¿cuál es la situación para el proceso β^+ ? A principios de la década de 1950 estas preguntas no parecían preocupar mucho a los físicos, aunque fueron la razón por la cual el experimento de Ray Davis no dio resultados positivos.

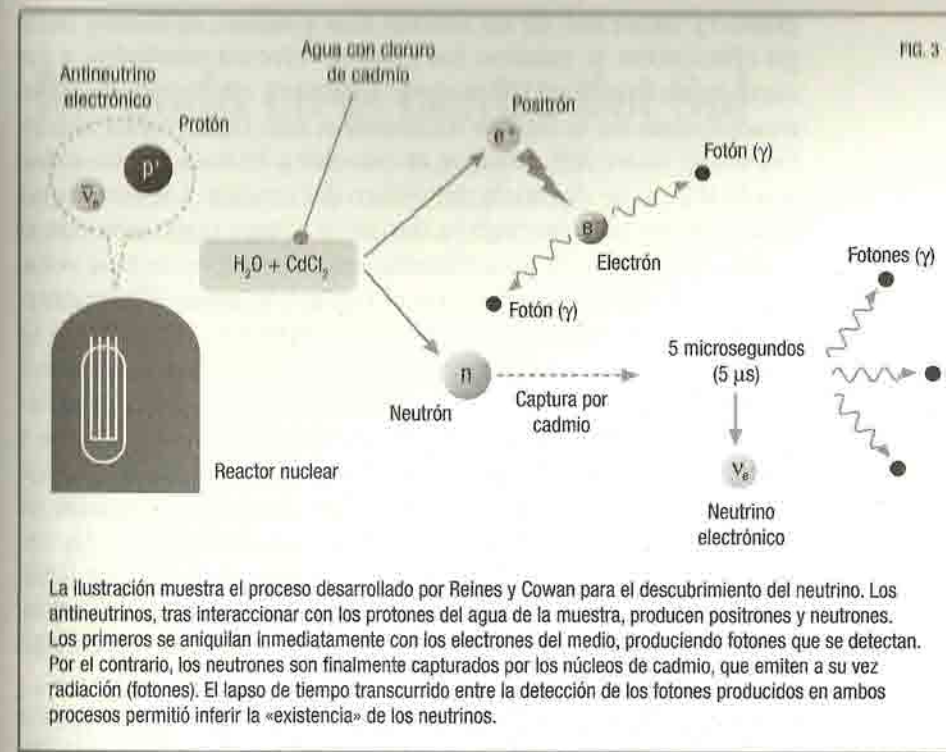
Procesos permitidos

Los electrones y positrones se aniquilan produciendo radiación (fotones). Análogamente, los fotones (radiación) pueden materializarse en pares partícula-antipartícula. En 1953 se introdujo una nueva propiedad, a la que se denominó *número leptónico*, para explicar por qué no se observaban determinados procesos. Así, se asignó un número leptónico +1 a los denominados *leptones* (partículas que no sienten la interacción fuerte), por ejemplo, el electrón, y -1 a los correspondientes *antileptones* (el positrón). Los procesos permitidos eran únicamente aquellos en los que se conservaba el número leptónico. El proceso de desintegración beta en el que un neutrón se transforma en un protón con la emisión de un electrón y un neutrino solo está permitido si lo que realmente se emite es el antineutrino. Solo de este modo, el número leptónico final es cero, idéntico al inicial. Análogamente, en el proceso β^+ el estado final está configurado por el positrón (-1) y el neutrino (+1). Algunos otros procesos permitidos son: 1) $p + e^- \rightarrow n + \bar{\nu}$ (*captura electrónica*), 2) $p + \bar{\nu} \rightarrow n + e^+$ (*desintegración beta inversa*). El término $\bar{\nu}$ denota al antineutrino. El proceso propuesto por Pontecorvo y analizado por Davis era: $n + \bar{\nu} \rightarrow p + e^-$. Sin embargo, nunca pudo observarse porque el reactor producía antineutrinos, los cuales no podían reaccionar con neutrones para producir protones y electrones. El número leptónico no se conservaría. Un proceso que sí permitiría detectar la existencia de los neutrinos sería la captura electrónica en carbono-11 (se muestra esquemáticamente en la figura), ya que en este caso sí se conserva el número leptónico.



repetir el experimento. En esta situación, Hans Bethe preguntó a Reines y Cowan cómo serían capaces de distinguir los neutrinos del resto de radiaciones producidas en la explosión. La única respuesta que pudieron encontrar fue modificar los planes del experimento. En vez de hacer uso de una explosión nuclear, los neutrinos se generarían con un reactor. Obsérvese la similitud con el estudio que estaba realizando Davis durante aquel mismo periodo.

El proceso en el que estaban interesados Reines y Cowan era el denominado *desintegración beta inversa*. Este consiste en que un neutrino (realmente, se trata del antineutrino) interactúa con un protón del material del detector dando lugar a un positrón y un neutrón. La cuestión era cómo poner en evidencia la reacción previa. Para ello, construyeron un pequeño detector cilíndrico lleno de agua con cloruro de cadmio (CdCl_2) y rodeado de un *material centelleador* (material que tiene la propiedad de emitir pulsos luminosos cuando una partícula cargada o fotón lo atraviesa). En las paredes del detector se colocaron numerosos *tubos fotomultiplicadores* que podían captar los destellos de luz producidos y transformarlos en señales eléctricas. ¿Qué procesos son los que indicarían a Reines y Cowan la presencia del neutrino? Por una parte, el positrón se aniquilaría rápidamente con uno de los electrones de la muestra dando lugar a un par de fotones (radiación electromagnética) en direcciones opuestas. Esta radiación induciría sendos destellos en el material *centelleador* que recogerían los fotomultiplicadores. Por otra parte, el neutrón producido tras la interacción del neutrino con el protón del hidrógeno se iría frenando paulatinamente (por choques con los protones del medio) hasta ser capturado por uno de los núcleos de cadmio. Este quedaría en un estado excitado (de mayor energía), y al «desexcitarse» emitiría radiación electromagnética (fotones) que de nuevo induciría pulsos luminosos en el *centelleador* y consiguientemente, una señal eléctrica en los fotomultiplicadores. El aspecto esencial del proceso previo es que el tiempo que debía transcurrir entre la primera señal, asociada a la desintegración del par electrón-positrón, y la segunda, relacionada con la absorción del neutrón, era aproximadamente



de unos 5 microsegundos. Este lapso era más que suficiente para medir claramente ambas señales, lo cual constituiría una prueba inequívoca de la presencia del neutrino (el proceso se muestra esquemáticamente en la figura 3).

El experimento se realizó en un primer momento en Harford (estado de Washington) durante el año 1953. Aunque Reines y Cowan mostraron una gran cautela en el análisis de los datos, todo parecía indicar que el número de señales aumentaba cuando el reactor estaba funcionando. Sin embargo, las señales también estaban presentes con el reactor apagado. Esto parecía una consecuencia de los efectos producidos por los rayos cósmicos, algo que ya había sucedido en el experimento de Davis. No obstante, las expectativas de Reines y Cowan parecían bastante más optimistas. Así pues, decidieron construir un detector más

grande y hacer uso de un reactor más potente. Al mismo tiempo eliminarían al máximo los posibles efectos asociados a los rayos cósmicos. En 1955 se llevó a cabo el nuevo experimento exactamente en la misma localización que Davis había usado: Savannah River. Allí, situaron el detector a 12 m de profundidad y solo a 11 m de distancia del centro del reactor. Los resultados obtenidos no ofrecían lugar a dudas: el equipo registraba con el reactor funcionando aproximadamente cuatro veces más señales que las que se obtenían con el reactor apagado. Finalmente, tras más de veinticinco años desde su postulado, el neutrino (o antineutrino) fue «capturado» y «observado» en un experimento. Su existencia era real y no simplemente la «descabellada» idea de un físico teórico. Así, lo primero que hicieron Reines y Cowan fue enviar un telegrama a Pauli el 14 de junio de 1956 con el siguiente texto: «Estamos encantados de informarle de que hemos detectado los neutrinos definitivamente...». La noticia dio la vuelta al mundo, y muchos años después, en 1995, Reines fue galardonado con el premio Nobel. Desgraciadamente, Cowan falleció antes y no pudo ver su trabajo recompensado con el máximo galardón científico.

Algunos años después del descubrimiento, Reines le recordó a Bethe su afirmación sobre la «imposibilidad, a efectos prácticos, de observar un neutrino». Bethe respondió: «No debería usted creer todo lo que lee en las revistas». Afortunadamente, esto es lo que sucedió con Pontecorvo, el primer físico que se atrevió a desafiar las conclusiones de Bethe, Peierls y tantos otros, y cuyo trabajo sirvió de inspiración para que el neutrino se convirtiese finalmente en una partícula real. No sería la única ocasión en la que la intuición y genio de Pontecorvo volviese a mostrarnos el camino a seguir.

Mirando en el centro del Sol

El químico Ray Davis no pudo ser el primero en capturar al neutrino, pero no se desanimó, y enseguida supo cuál sería su próximo objetivo. ¿Por qué hacer uso de reactores o explosiones atómicas cuando disponemos del mayor generador de neutrinos, el Sol? Además, quizá el neutrino permitiese descubrir algunos de los secretos mejor guardados de nuestra estrella.

El Sol siempre ha formado parte de nuestras vidas. De hecho, sin la presencia de esa gran bola brillante que nos proporciona luz y calor no estaríamos aquí. Es natural que el hombre se haya hecho siempre preguntas sobre su naturaleza, sobre su inicio, sobre su funcionamiento, sobre cuánto tiempo perdurará aún. El ser humano siempre ha sentido necesidad de comprender el mundo en el que vive, y el Sol es uno de los actores principales. Muchos años han tenido que transcurrir para ir desentrañando los secretos mejor guardados de nuestra estrella, y en este camino, ¿quién podía pensar que el esquivo neutrino pudiese desempeñar un papel importante? ¿Quién podía imaginar que el Sol mismo nos ayudase a comprender mejor la naturaleza del propio neutrino? El Sol siempre ha estado ahí, delante de nosotros, produciendo radiación continuamente y generando también un innumerable número de neutrinos. Así pues, ¿por qué no intentar detectarlos? Este fue el proyecto en el que se embarcó Davis tras su primer fracaso. Un proyecto que le ocupó el resto de su vida y que trajo consigo profundas satisfacciones, pero también grandes sinsabores. Quizá ha sido el ejemplo más claro de esfuerzo y perseverancia por parte de un físico en la consecución de sus objetivos.

EL SOL: FUENTE DE ENERGÍA Y VIDA

La primera teoría sobre el Sol fue propuesta en el siglo V antes de Cristo por el filósofo griego Anaxágoras (500-428 a.C.). De la observación de algunos meteoritos caídos en la Tierra, Anaxágoras concluyó que el Sol era básicamente hierro al rojo vivo. Esta imagen perduró durante más de 2000 años, y solo empezó a ser cuestionada a partir del siglo XIX, época en la que la física alcanzó un desarrollo extraordinario constituyéndose como una ciencia perfectamente estructurada y capaz de explicar la mayoría de los fenómenos naturales. Recuérdese que es el siglo en el que los grandes conceptos de la termodinámica adquieren una sólida base, y esto permite comprender los procesos en los que la energía se transforma de un tipo en otro. Es la época de la revolución industrial en la que se construyen grandes hornos capaces de generar una enorme cantidad de energía. Sin embargo, ello solo es posible si se aporta suficiente cantidad de combustible. Los físicos de la época sabían perfectamente que cualquier material incandescente se enfriaba con rapidez, dejando de producir calor (energía) en un tiempo relativamente breve. Este principio general debía aplicarse también al Sol; por consiguiente, si este era una gran bola de hierro al rojo vivo, al cabo de un tiempo terminaría enfriándose.

En el siglo XIX solo se conocían dos posibles reacciones que permitirían al Sol generar su energía. La primera era considerar procesos químicos. El Sol era como un gran horno en el que se producía una enorme variedad de reacciones químicas. El problema es que los cálculos realizados con el esquema de la física conocida hasta entonces no proporcionaban resultados adecuados. Si todo el combustible era producto de reacciones químicas, este se debería haber consumido hace muchísimo tiempo. De hecho, la edad que se estimó para el Sol era menor que la propia historia del ser humano. Debía existir otro mecanismo que proporcionase la energía requerida, y este únicamente podía ser el de la gravedad. Se introdujo así la imagen de innumerables meteoritos cayendo sobre el Sol (produciendo por consiguiente energía), y el propio colapso gravitatorio del Sol, es decir, la

contracción del mismo debido a su propio peso. Estas ideas fueron elaboradas en detalle por lord Kelvin durante la segunda mitad del siglo XIX. Haciendo uso de las leyes generales

de la termodinámica, lord Kelvin concluyó en 1897 que la edad más probable de la Tierra y del Sol era del orden de 25-30 millones de años. Esta conclusión era a todas luces inconsistente con todos los estudios geológicos realizados durante aquellos mismos años, así como con la *teoría de la evolución* desarrollada por Charles Darwin (1809-1882). En ambos casos, el tiempo requerido para las formaciones geológicas y la evolución de las especies era extremadamente mayor. Así pues, a pesar de las afirmaciones de lord Kelvin (véase el capítulo 1), la situación existente era ciertamente paradójica, y no resultaba fácil entender cómo tal discrepancia podría resolverse simplemente con cálculos más y más precisos. Lo que en realidad se necesitaba era un mecanismo distinto, algo completamente desconocido, que pudiese explicar cómo el Sol podía generar toda esa luz y calor durante miles de millones de años. La alternativa era considerar que la geología y la biología estaban profundamente equivocadas, algo difícil de admitir incluso en aquellos años.

El Sol es una masa de piedra ardiendo, un poco mayor que Grecia.

ANAXÁGORAS

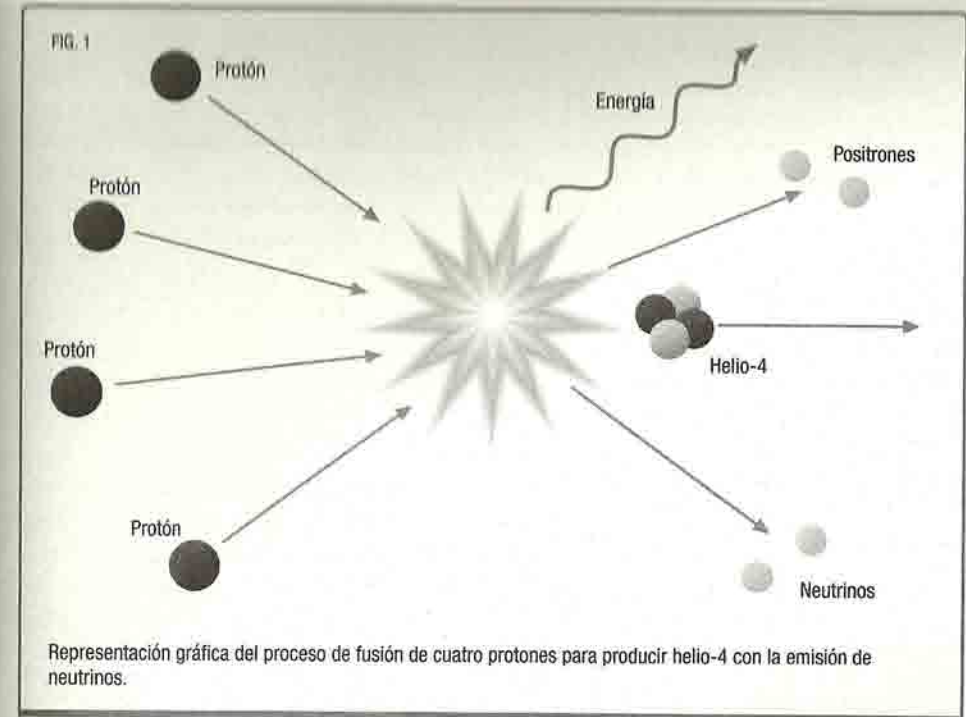
UNA NUEVA IMAGEN DEL SOL

¿Podría ser la radiactividad una respuesta al problema mencionado? Esta es la pregunta que se planteó Rutherford a comienzos del siglo XX. La radiactividad era un fenómeno nuevo por el que diversos materiales emitían energía de modo natural. Además, pudo comprobarse que el periodo de semidesintegración de algunas sustancias era del orden de cientos/miles de millones de años, es decir, un lapso de tiempo similar al necesario para que las formaciones geológicas terrestres hubiesen podido desarrollarse. Indudablemente, era un camino prometedor y Rutherford decidió explorarlo en sus detalles. En 1904 expuso sus ideas en la *Royal Institution*. Entre los asistentes se encontraba el mis-

mo lord Kelvin. Rutherford, sabiendo que su propuesta contradecía por completo la teoría de Kelvin, mostró un cuidado exquisito en sus afirmaciones. Así, manifestó que la teoría de Kelvin era básicamente correcta a no ser que existiese una nueva fuente de energía. Esta fuente era la radiactividad.

La imagen de Rutherford se vio refrendada en un principio por las mediciones del espectro de luz solar. Estas reflejaban claramente que uno de los elementos químicos más abundantes en el Sol era el helio. Este elemento coincidía con el producto de la radiación α . Así pues, parecía plausible pensar que el Sol contenía elementos radiactivos pesados, como el uranio, cuyas desintegraciones producían el helio observado. Sin embargo, la situación real no resultó tan sencilla. El espectro solar no mostraba ninguna evidencia de la presencia de elementos radiactivos que produjesen *partículas alfa*. La situación volvía a resultar bastante confusa. La radiactividad era un mecanismo que permitía generar energía durante miles de millones de años, pero la composición del Sol no era compatible con los procesos radiactivos conocidos que producían helio. De nuevo, se planteaba una disyuntiva, o la radiactividad no es, después de todo, el mecanismo adecuado para producir energía en el Sol, o existe una forma diferente a la desintegración de núcleos radiactivos que permita generar helio.

La respuesta al problema estaba contenida en el interior de los núcleos atómicos. El principio básico descubierto por Einstein, el *principio de equivalencia masa-energía*, mostraba que si un sistema se transformaba en otro más estable, es decir, con menos masa, se desprendía de la diferencia de masas en forma de energía. Esto es justamente lo que sucedía, por ejemplo, cuando un núcleo radiactivo pesado decaía en otro emitiendo partículas alfa. Sin embargo, ¿no podía suceder algo similar si dos núcleos ligeros se unían (fusionaban) en otro más pesado? Esta fue la revelación que tuvo Arthur Eddington (1882-1944) en 1920 a partir de los resultados que había obtenido su colega Francis Aston (1877-1945) algunos meses antes. Este había descubierto que la masa de un átomo de helio era ligerísimamente inferior a la suma de las masas de cuatro átomos de hidrógeno.



Esto significaba que si estos cuatro átomos pudiesen fusionarse en un solo átomo de helio, el proceso produciría una enorme cantidad de energía (figura 1). Eddington se convenció de que este era realmente el mecanismo que permitía al Sol brillar y generar toda su energía durante miles de millones de años. Sin embargo, ¿por qué dicho proceso no se había observado nunca en la Tierra? La respuesta era obvia. Las condiciones en la Tierra y en el Sol son muy diferentes. Para que cuatro protones (los núcleos de hidrógeno) pudiesen llegar a fusionarse era necesario vencer la fuerte *repulsión electromagnética* entre los mismos. Recuerdese que se trata de partículas con carga positiva, y que la repulsión entre ellas es tanto mayor cuanto más se aproximan. La única forma de vencer dicha repulsión era proporcionando a los átomos de hidrógeno una energía enorme, y esto solo podía tener lugar en condiciones extremas de temperatura,

ENERGÍA DE LIGADURA EN LOS NÚCLEOS

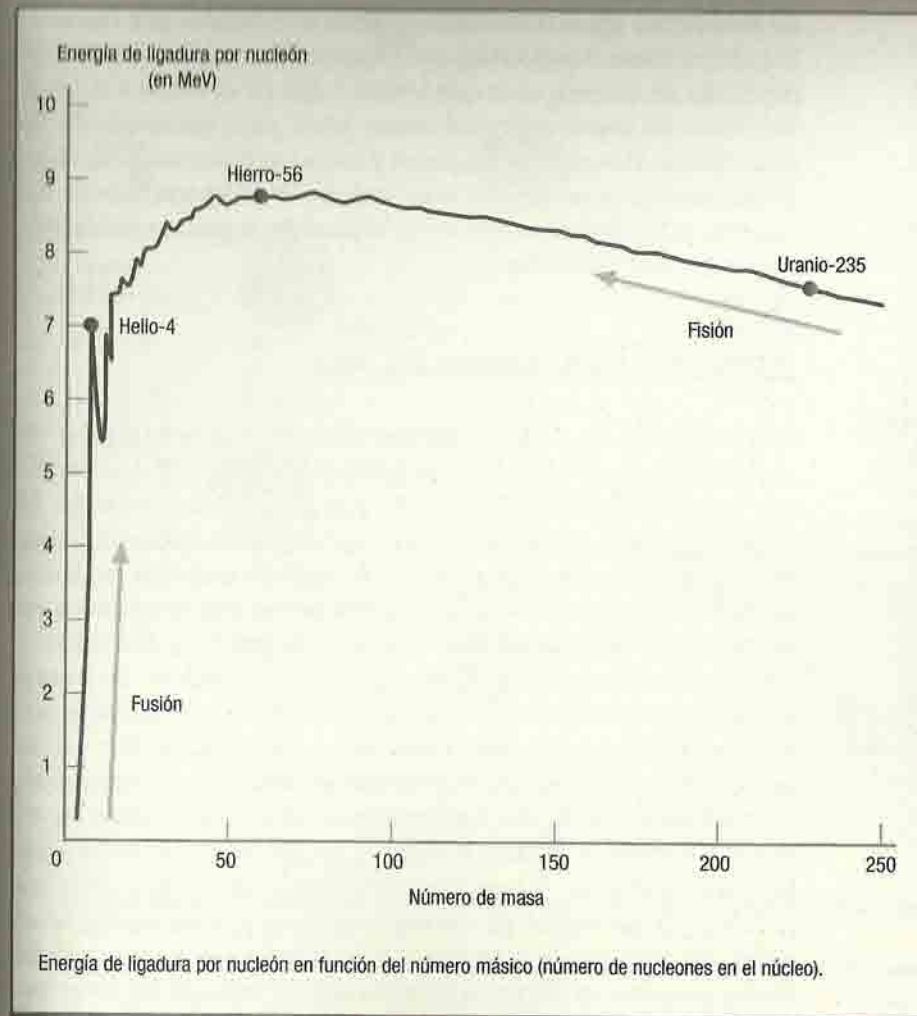
La imagen del núcleo atómico es la de un sistema complejo constituido por protones y neutrones. Estas partículas, denominadas genéricamente *nucleones*, se encuentran fuertemente ligadas dentro de los límites de las dimensiones del núcleo: aproximadamente, unos cinco órdenes de magnitud menor que el tamaño promedio del átomo. Se denomina *interacción fuerte* a la responsable de mantener unidos a los nucleones en el interior de los núcleos. Como su nombre indica, se trata de una fuerza de enorme intensidad que permite vencer la fuerte *repulsión electrostática* entre los protones. Por otra parte, la interacción fuerte solamente actúa dentro de los límites del núcleo atómico. A esta propiedad se la conoce como *interacción de corto alcance*.

Estabilidad del sistema nuclear

La interacción fuerte es la responsable de la estructura de los núcleos atómicos y de su estabilidad. Se denomina *energía de ligadura nuclear* a la energía necesaria que habría que suministrar a un núcleo para romperlo en sus constituyentes: protones y neutrones. Puede entenderse fácilmente este concepto teniendo en cuenta que la masa de un núcleo atómico es siempre menor que la suma de las masas de sus constituyentes. Esto explica que el sistema nuclear sea más estable y, por tanto, que sea esta la estructura que se muestra en el mundo natural. Cuanto mayor sea la energía de ligadura tanto más estable será el sistema nuclear. Un concepto que resulta especialmente ilustrativo para entender el comportamiento del mundo subatómico es el cociente entre la energía de ligadura y el número de nucleones que existen en el núcleo (se denota como B/N). Esta magnitud representa una estimación de la energía promedio que habría que suministrar a un núcleo para arrancar un nucleón. Así pues, B/N es una medida de la estabilidad nuclear.

El hierro marca el camino

Al representar la magnitud B/N frente al número de nucleones, N , el resultado es el que se muestra en el gráfico. En él se observa que el valor máximo se alcanza para el hierro-56, que corresponde al núcleo de mayor estabilidad. Para núcleos más pesados, situados a la derecha del hierro-56, obsérvese que la curva para la energía de enlace por nucleón, B/N , va disminuyendo progresivamente de modo continuo. Esto indica que se trata de sistemas «menos» estables que el hierro-56. En el caso de núcleos más ligeros, situados a la izquierda, también se observa una disminución bastante más pronunciada en la curva B/N ; un nuevo reflejo de la menor estabilidad de estos sistemas ligeros en comparación con el hierro-56. Este comportamiento global de la energía de enlace por nucleón indica que la rotura o desintegración de núcleos más pesados que el hierro conduciría a sistemas más estables y, por consiguiente, se liberaría una gran cantidad de energía. Estos son los denominados *procesos de fisión nuclear*, base de los actuales reactores nucleares (estos procesos vienen representados en la figura con la flecha que indica fisión). Por otra parte, la unión de núcleos más ligeros que el hierro también podría conducir a sistemas más estables liberando energía. Este camino corresponde a la *fusión nuclear*, origen de la energía producida en el Sol (véase la indicación fusión en la figura).

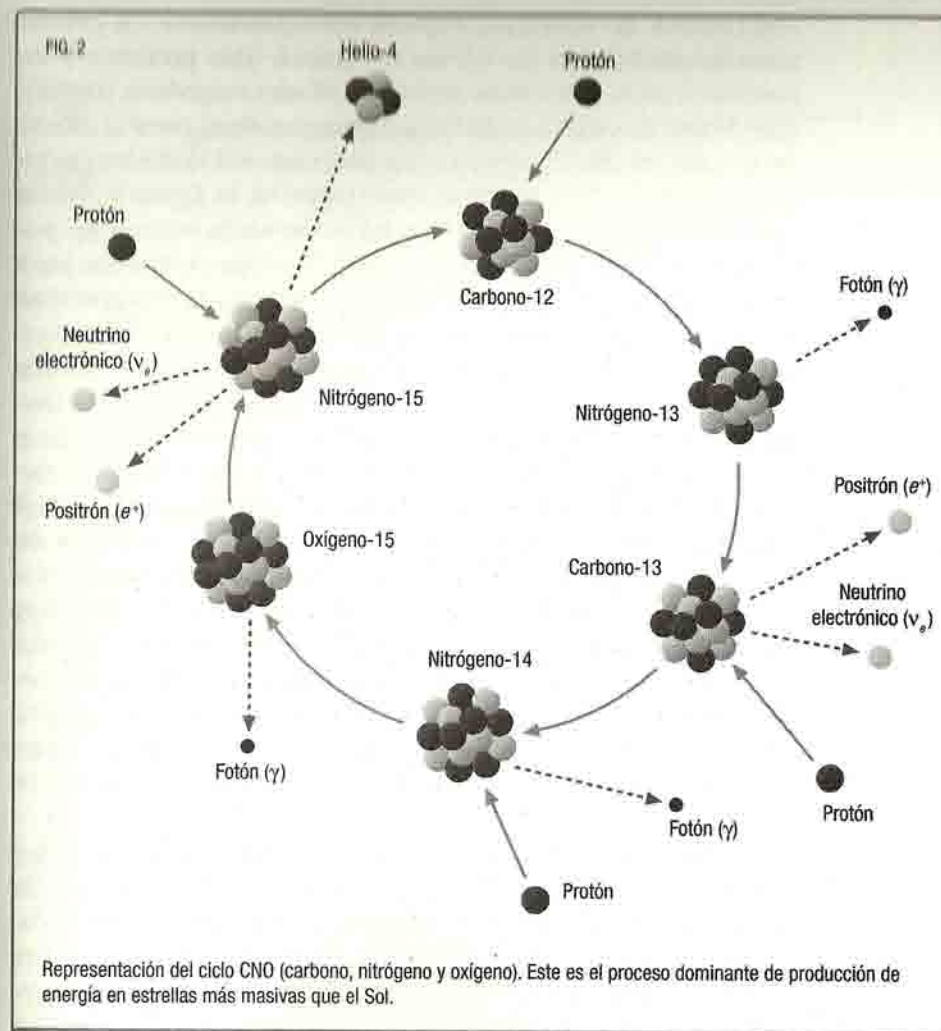


Es interesante observar en el gráfico la gran estabilidad del helio-4 (elevado valor de B/N) en comparación con los núcleos de su entorno. Esta propiedad del helio-4 permite entender, de modo cualitativo, por qué algunos núcleos pesados emiten de modo natural partículas alfa (núcleos de helio-4), transformándose en sistemas más ligeros y estables.

justamente la situación existente en el interior del Sol donde esta se estimaba en unos catorce millones de grados. La idea de Eddington resultó reveladora, pero aún faltaba por desarrollar el mecanismo específico que proporcionase una descripción detallada de los procesos que tenían lugar en el interior del Sol. Hubieron de transcurrir casi veinte años para encontrar dicho mecanismo. Fue obra de un joven y brillante físico teórico, Hans Bethe, el mismo que estimó la probabilidad de interacción de los neutrinos concluyendo que sería imposible, a efectos prácticos, detectar tales partículas.

¿QUÉ SUCEDE EN EL INTERIOR DEL SOL?

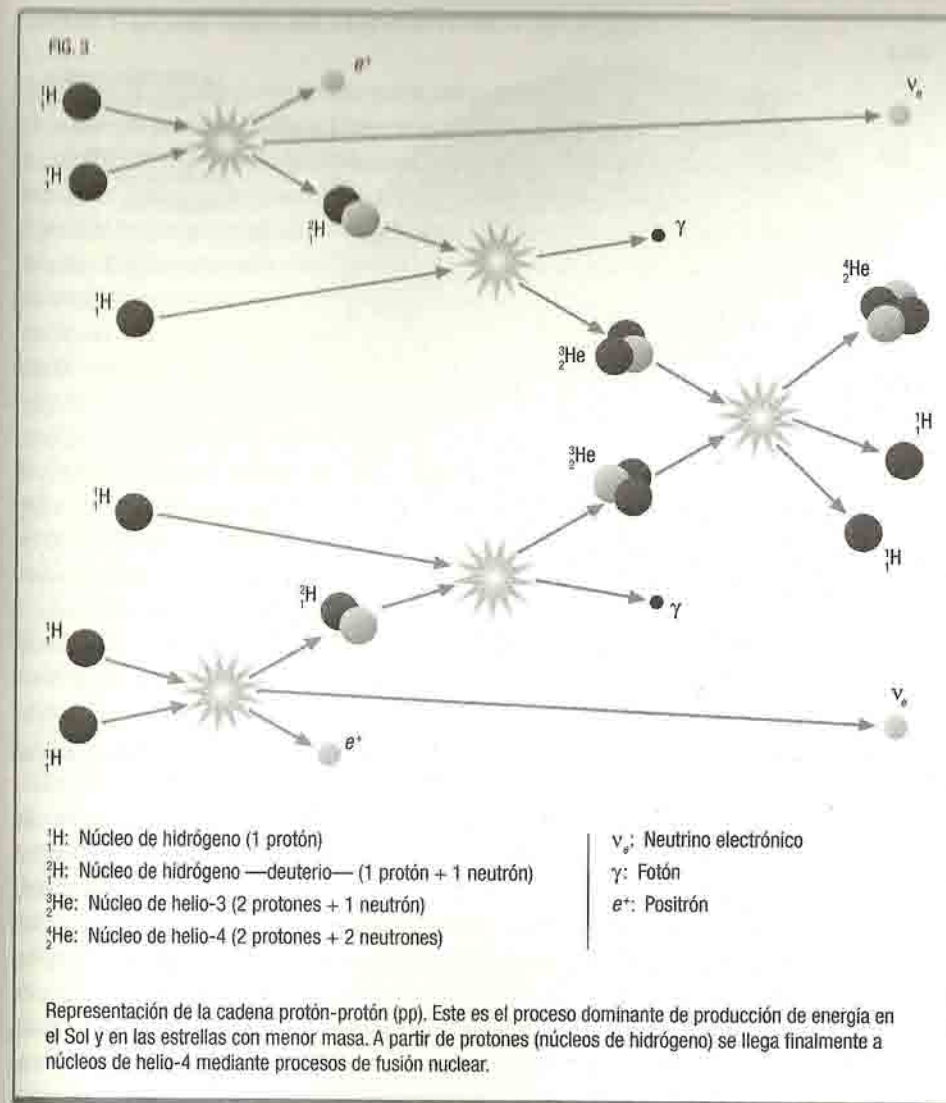
Bethe publicó en 1939 el trabajo titulado «La producción de energía en las estrellas». En el mismo describió los dos procesos fundamentales que dan lugar a la producción de helio. El primero se denomina *ciclo CNO* (acrónimo de carbono, nitrógeno y oxígeno). En este proceso, átomos de carbono capturan protones (núcleos de hidrógeno) transformándose primero en núcleos de nitrógeno y posteriormente de oxígeno. Por último, tras la emisión de helio, terminan transformándose de nuevo en carbono. El ciclo se representa en la figura 2. Obsérvese que los tres núcleos, carbono, nitrógeno y oxígeno, actúan como catalizadores acelerando el proceso de fusión de los protones en núcleos de helio. En este proceso, aparte del helio y la radiación electromagnética (fotones), se producen también positrones y neutrinos. El verdadero problema con el ciclo CNO era justificar la presencia de carbono en las estrellas en cantidad suficiente para que la reacción previa tuviese lugar. La teoría de Bethe permitía explicar la producción de energía en estrellas más calientes y masivas que el Sol. Para que el ciclo CNO fuese el proceso fundamental de generación de energía se necesitaba una temperatura superior a los 17 millones de grados. Esto significaba que la energía asociada al proceso CNO era claramente minoritaria en el caso del Sol, por lo que resultaba necesario encontrar un nuevo mecanismo de producción de energía.



El nuevo proceso, principal responsable de la energía producida en el Sol y en estrellas más pequeñas, se denomina *cadena protón-protón* (*cadena pp*). En el mismo, dos protones (núcleos de hidrógeno) colisionan fusionándose en un núcleo de *deuterio* (constituido por un protón y un neutrón). En esta primera reacción se emiten positrones y neutrinos. El *deute-*

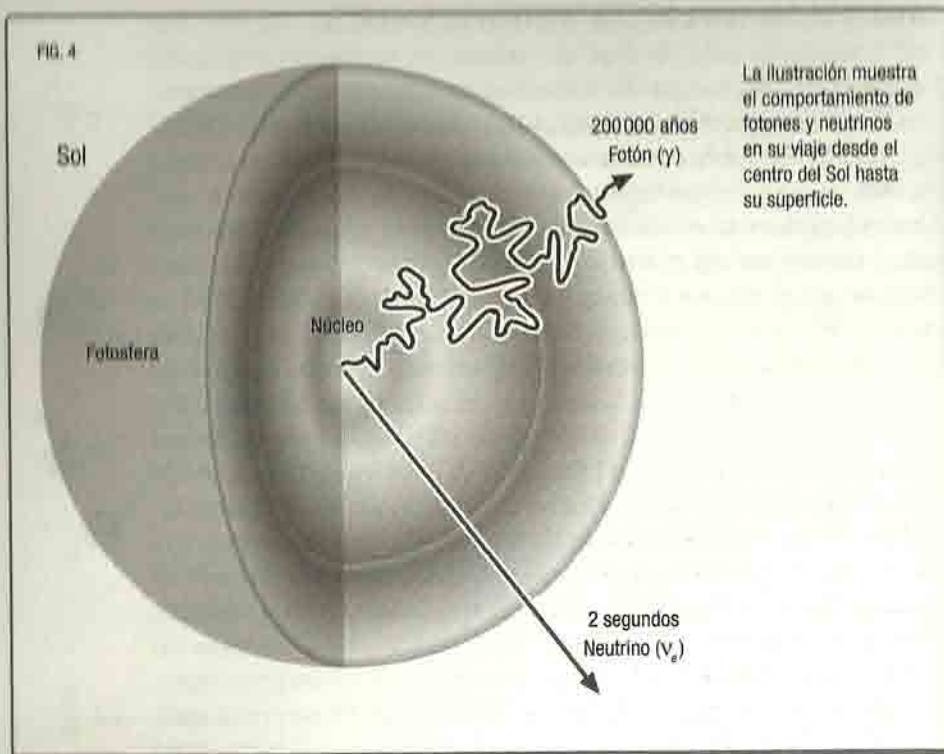
rón (núcleo de deuterio) captura inmediatamente un protón transformándose en un núcleo de helio-3 (dos protones y un neutrón) con la emisión de radiación electromagnética (fotón). Por último, dos núcleos de helio-3 interaccionan entre sí dando lugar a un núcleo de helio-4 (dos protones y dos neutrones) y dos protones. El ciclo pp se representa en la figura 3. Bethe demostró que los procesos involucrados en la cadena pp podrían tener lugar a temperaturas inferiores a las necesarias para el ciclo CNO. Además, pudo comprobarse que la probabilidad de que, tras la interacción de los dos protones, estos pudiesen fusionarse era extremadamente pequeña. Este resultado era fundamental para explicar por qué el Sol llevaba brillando tantos miles de millones de años, y por qué aún perdurará otros miles de millones más. A pesar de lo improbable del proceso de fusión, la ingente cantidad de protones contenidos en el Sol era suficiente para que la cadena pp tuviese lugar. La teoría de Bethe proporcionó por primera vez una explicación satisfactoria de cómo funcionaba el Sol. Los cálculos concordaban con las evidencias experimentales disponibles; sin embargo, ¿cómo estar seguros de que estos procesos eran realmente los que tenían lugar en el interior del Sol? ¿Podríamos llegar a «mirar» en su centro? Bethe proporcionó también una respuesta a estas preguntas, aunque en aquellos momentos no fuera consciente de ello.

Obsérvese que en la cadena pp el resultado global es la generación de helio-4 a partir de cuatro protones. En este proceso la energía producida se reparte entre todas las partículas generadas: positrones, fotones y neutrinos. Los positrones se aniquilan rápidamente con electrones produciendo radiación electromagnética. Así pues, tenemos fotones y neutrinos. Los fotones, en su camino hacia el exterior del Sol, interaccionan con todas las partículas cargadas siendo absorbidos y emitidos de nuevo. Durante todo este proceso su energía va disminuyendo hasta que finalmente llegan a la superficie del Sol, donde emergen como luz visible. Este viaje de los fotones desde el centro del Sol, donde son generados, hasta la superficie tiene una duración de centenares de miles de años. Por el contrario, la situación es



radicalmente diferente para los neutrinos (figura 4). Estos alcanzan la superficie del Sol en pocos segundos sin interaccionar prácticamente con nada, y tras un viaje de unos ocho minutos llegan a la Tierra. Cuando Bethe escribió su artículo, la opinión

FIG. 4



generalizada era que el neutrino era una simple invención de Pauli, una partícula que nunca podría detectarse. Esto explica que Bethe no hiciese ninguna mención al papel que los neutrinos podrían tener en el futuro respecto a la propia imagen del Sol. Algunos años después, con el trabajo de Pontecorvo y los experimentos de Davis, Reines y Cowan (véase el capítulo 2), la situación cambió por completo. Los neutrinos, producidos en ingentes cantidades por el Sol, podrían ser detectados. El estudio y «captura» de los neutrinos solares podría proporcionar una información muy precisa, quizá la más valiosa, sobre la propia estructura del Sol. Este fue el proyecto en el que se embarcó Ray Davis, un proyecto que duró toda una vida y que, además de permitirnos mirar en el centro del Sol, nos ayudó a entender mejor la propia naturaleza del neutrino.

DAVIS Y LA CAPTURA DE LOS NEUTRINOS SOLARES

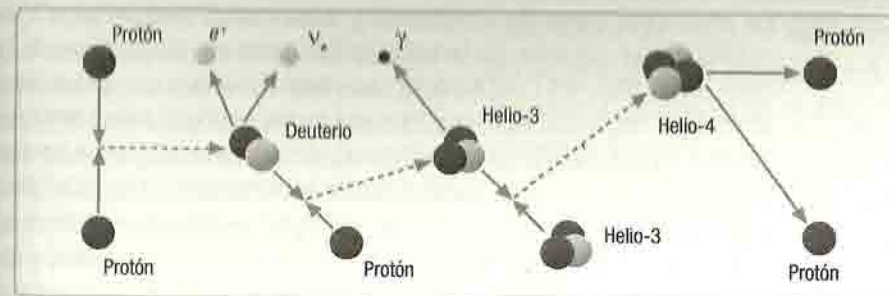
Ray Davis estaba preparado para detectar los neutrinos producidos en el centro del Sol. Disponía del tanque de cloro que había construido siguiendo la propuesta original de Pontecorvo. Quizá en esta ocasión la suerte estuviese de su parte; el Sol producía neutrinos y no antineutrinos como había sido el caso de los reactores. Davis conocía perfectamente las condiciones que debían cumplir los neutrinos para que pudiesen inducir la transformación de núcleos de cloro en argón, y así, poder detectarlos. Los neutrinos debían poseer una energía superior a un cierto valor mínimo que se estimó en 0,814 MeV. El MeV es el acrónimo de megaelectronvoltio, una unidad de energía que corresponde a un millón de eV (electrón-voltio). El eV es la energía adquirida por un electrón cuando es sometido a una diferencia de potencial de un voltio. Las unidades MeV y potencias superiores son adecuadas en procesos donde intervienen los núcleos atómicos.

La limitación energética del detector de Davis supuso la primera complicación. La teoría de Bethe mostraba que los neutrinos producidos por la cadena pp tenían una energía considerablemente inferior al límite necesario. Por el contrario, el ciclo CNO sí daba lugar a neutrinos que podrían detectarse. La dificultad era que este último ciclo tenía una contribución menor, mínima en opinión de algunos físicos, en la producción de energía en el Sol. Recuérdese que el proceso fundamental era la cadena pp. Por tanto, la única posibilidad que se presentaba ante Davis era la captura de neutrinos asociados al ciclo CNO, algo bastante improbable en el caso del Sol. Y esto es justamente lo que sucedió con los primeros datos. El detector no mostraba ningún indicio claro de la captura de neutrinos solares, un resultado que no extrañó a muchos físicos y que, por consiguiente, pasó bastante desapercibido. El equipo experimental de Davis solo tenía «ojos» para el proceso de producción de energía solar menos probable. Así pues, no parecían existir muchas alternativas: o se modificaba el detector para que pudiese capturar neutrinos con menos energía, o existía algún otro proceso en el Sol, aún no conocido, que pudiese *excitar* los

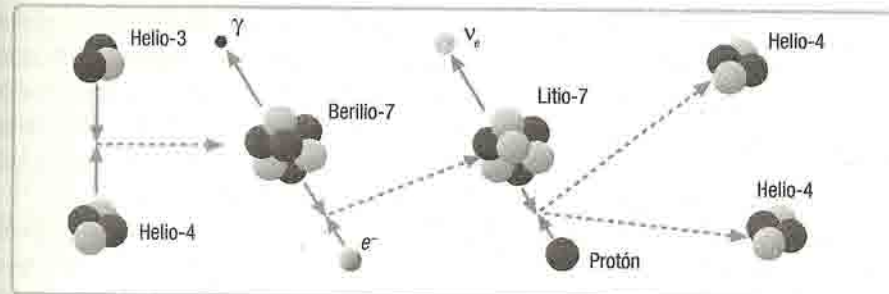
núcleos de cloro. Fue esta segunda opción la que volvió a traer la esperanza a Davis.

En 1958 Bethe descubrió que en el desarrollo de procesos correspondientes a la cadena pp podían existir varios caminos. Una vez formados los núcleos de helio-3, aparte de fusionarse para producir helio-4 (el proceso que se explicó en la sección previa; véase también el diagrama PPI en la figura 5), otra posibilidad era que el helio-3 interaccionase directamente con helio-4 (diagrama PPII de la figura 5). Esto era posible al existir ya en el Sol (después de miles de millones de años) una cantidad apreciable de helio-4. La reacción entre helio-3 y helio-4 producía núcleos de berilio-7 (cuatro protones y tres neutrones). Bethe admitió en un principio que el proceso previo era posible aunque muy poco probable, opinión que debió abandonar tras los experimentos realizados por varios investigadores en el Laboratorio de Investigación Naval de Washington. Finalmente, una vez producido el berilio-7, este podía capturar un protón transformándose en boro-8 (proceso denotado con PPIII en la figura 5), un núcleo radiactivo que decaía por desintegración beta en berilio-8 con la emisión de positrones y neutrinos. Lo realmente interesante de estos nuevos procesos era que los neutrinos emitidos tenían energía más que suficiente para activar el detector de Davis. Parecía que se había abierto una nueva puerta para que la perseverancia de este fuese finalmente recompensada. Sin embargo, no fue tan fácil. Una vez más los resultados de Davis no fueron nada concluyentes. Ni aun enterrando el detector a más profundidad podían apreciarse señales más allá de las proporcionadas por el fondo de radiación cósmica. A todo ello se unió un nuevo trabajo en el que se mostraba que la transformación de berilio-7 en berilio-8, y la consiguiente emisión de neutrinos, era un proceso muy improbable. De nuevo, las dificultades surgían por doquier, y cada vez que se abría una puerta otras dos se cerraban. Fue una época de profunda frustración para Davis. Cualquier otro físico habría decidido abandonar el proyecto dirigiendo su mirada a nuevos campos no tan exigentes. Sin embargo, Davis estaba demasiado implicado. Él perseguiría al neutrino aunque se tratase de un fantasma.

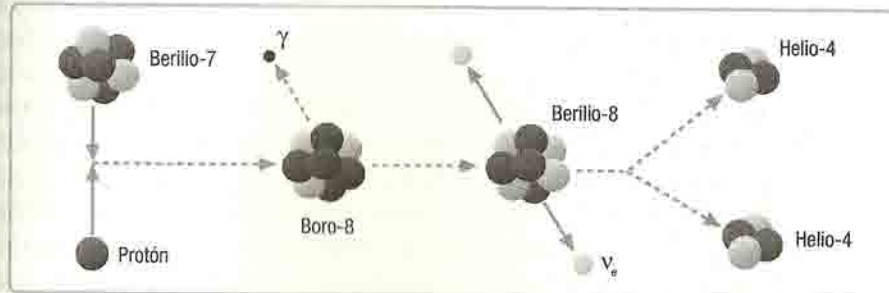
PPI



PPII



PPIII



ν_e : Neutrino electrónico γ : Fotón e^+ : Positrón e^- : Electrón

Representación de las tres posibles cadenas protón-protón que tienen lugar en el Sol.

FIG. 5

JOHN BAHCALL ENTRA EN ESCENA

La vida está llena de sorpresas y momentos inesperados que modifican el devenir de la misma. En 1960 un joven físico teórico, John Bahcall (1934-2005), escribió un artículo que envió a la revista *Physical Review*. El trabajo fue revisado por William Fowler (1911-1995), un astrofísico que conocía muy bien el trabajo de Davis. El joven Bahcall había estudiado en detalle el proceso de captura de electrones (con la consiguiente emisión de neutrinos) comprobando que la probabilidad de que dicho proceso tuviese lugar dependía mucho de las condiciones en que se produjera. Así, el ritmo del proceso en el laboratorio de la Tierra o en el centro del Sol podía ser muy distinto. El trabajo de Bahcall impresionó de tal modo a Fowler que este le ofreció un puesto en el Instituto Tecnológico de California (Caltech). Además, escribió a Davis informándole de que había un joven físico que podía calcular el ritmo de procesos nucleares que tenían lugar en el seno del Sol. Bahcall podía proporcionar a Davis la información que necesitaba para proseguir con su experimento.

El encuentro entre Davis y Bahcall cambió la vida de ambos. A partir de aquel momento, los dos físicos se embarcaron en una empresa (el estudio de los neutrinos solares) que consumió todas sus capacidades y a la que se entregaron de lleno durante el resto de sus vidas. Davis pidió a Bahcall que estimase el ritmo de producción de neutrinos generados por la desintegración del boro-8. Era esencial conocer este flujo de neutrinos energéticos para decidir si podrían capturarse en el tanque de cloro sin especial dificultad. Los primeros cálculos de Bahcall resultaron muy decepcionantes. Los resultados mostraban que solo podría detectarse aproximadamente un neutrino cada cien días, un ritmo despreciable para embarcarse en tal proyecto. Davis y Bahcall estimaron que podrían tener éxito construyendo un tanque más grande y situándolo a una profundidad mínima de unos 1 200 m. No obstante, aun así, la tasa de captura calculada por Bahcall seguía resultando demasiado pequeña. Aunque Davis comenzó a buscar una mina subterránea donde poder situar el nuevo tanque de cloro, la situación era bastante incierta.

En el verano de 1963, durante una visita al famoso Instituto Niels Bohr en Copenhague, Bahcall discutió con el físico Ben Mottelson (1926) algunos procesos que podrían tener una contribución importante en la tasa de recuento de neutrinos. En concreto, Bahcall incorporó en sus cálculos la posibilidad de que el núcleo de argón, resultante de la transformación del cloro, quedase en un estado excitado. Los resultados que obtuvo fueron sorprendentes: el ritmo de captura de neutrinos por el cloro aumentaba en un factor de 20. Esto era todo lo que necesitaba Davis para seguir adelante con el proyecto. Durante los meses siguientes se embarcó en la construcción de un tanque de 400 000 litros de cloro, y además, comenzó la búsqueda de una localización adecuada para el detector.

Los descubrimientos más importantes darán respuestas a cuestiones que aún no sabemos cómo preguntar e implicarán a objetos que todavía no hemos investigado.

JOHN BAHCALL

EL PROBLEMA DE LOS NEUTRINOS SOLARES

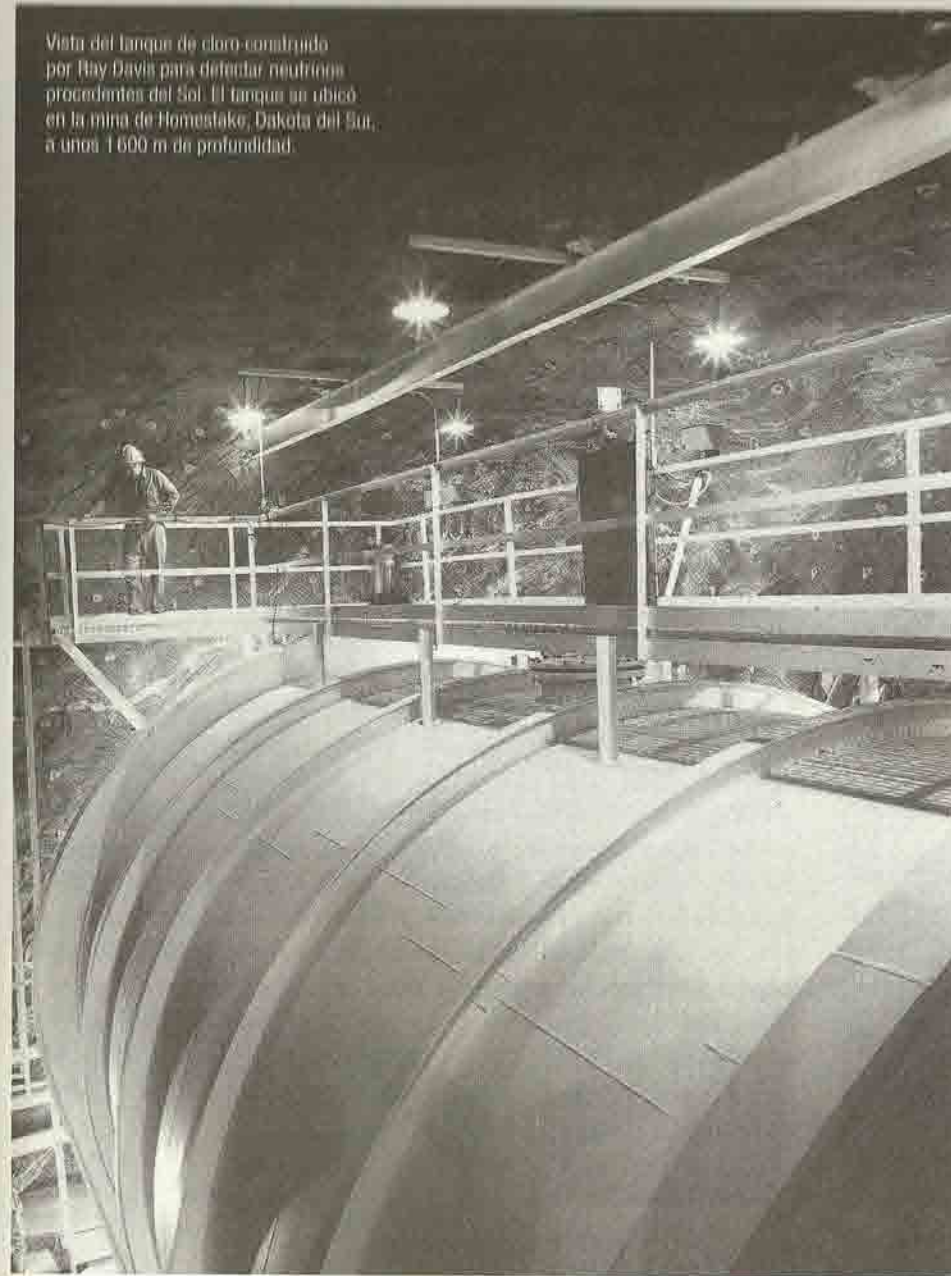
Davis y Bahcall convencieron a Maurice Goldhaber (1911-2011), director del Laboratorio Nacional de Brookhaven, para que financiase el proyecto. Tras diversas vicisitudes, y con la inestimable ayuda que significó que se hiciese mención explícita al proyecto en la revista *Time*, se decidió finalmente situar el enorme tanque de cloro en la mina de Homestake en Lead (Dakota del Sur), a unos 1 600 m de profundidad. A finales del verano de 1966 habían finalizado todos los trabajos de acondicionamiento de la mina, y el tanque había sido trasladado a la misma (véase la fotografía de la pág. 81). Todo estaba listo para comenzar a «detectar» a los elusivos neutrinos solares. ¿Quién podía imaginar entonces que tendrían que transcurrir más de treinta años para que se pudiese comprender la naturaleza de los resultados que estaban a punto de obtenerse?

Bahcall fue mejorando extraordinariamente la precisión de sus cálculos, incluyendo todos los procesos que podían contri-

buir en la producción de energía del Sol. En aquellos momentos no existía ninguna otra teoría que pudiese explicar con más precisión y claridad cómo funcionaba el Sol. Bahcall pudo estimar el número de neutrinos producidos por nuestra estrella cada segundo. Concluyó que unos 66 000 millones de neutrinos solares atravesaban cada centímetro cuadrado de la Tierra cada segundo. De este número, solo una pequeña fracción tendría la energía requerida para poder ser detectados por la cámara de Davis. Bahcall estimó esta fracción en aproximadamente una diezmilésima parte del total, y de estos, solo unos pocos inducirían la transformación del cloro en argón. La predicción final de Bahcall fue de unos 10 neutrinos solares por semana. En 1968 Davis anunció las primeras evidencias experimentales. El equipo experimental era capaz de *detectar* claramente los neutrinos solares, pero el número que se obtenía era claramente inferior a la predicción teórica, aproximadamente un tercio.

La discrepancia significativa entre el experimento y la teoría dejó perplejos a muchos físicos, especialmente a Davis y Bahcall. Surgió entre la comunidad científica una sensación de confusión e incertidumbre produciéndose una clara separación entre los astrofísicos, claros defensores de la teoría de Bahcall, y los físicos experimentales que se mostraban muy confiados en el trabajo de Davis. En cualquier caso, resultaba imprescindible salir de este *impasse*, y para ello no existía otro camino que seguir afianzando tanto el trabajo experimental como los cálculos teóricos. Durante los años siguientes, este fue el objetivo fundamental de ambos físicos. Por una parte, Davis y los técnicos de Brookhaven mejoraron la electrónica del equipo experimental desarrollando nuevos dispositivos que ayudaron a reducir de modo apreciable las señales de fondo, es decir, todas aquellas señales que no eran debidas a los neutrinos solares. A principios de la década de 1970, Davis hizo públicos los nuevos análisis mostrando que las evidencias seguían siendo muy similares a las obtenidas años antes. Por otra parte, Bahcall continuó refinando su teoría con la incorporación de todos los nuevos datos sobre reacciones nucleares que se fueron obteniendo durante aquellos años. Al igual que le ocurrió

Vista del tanque de cloro-combuido por Ray Davis para detectar neutrinos procedentes del Sol. El tanque se ubicó en la mina de Homestake, Dakota del Sur, a unos 1 600 m de profundidad.



a Davis con sus datos, los nuevos cálculos no mostraban diferencias apreciables con los previos. La discrepancia entre lo que debería detectarse, de acuerdo con la teoría de Bahcall, y lo que realmente se medía seguía siendo excesiva. El experimento de Davis siguió funcionando hasta 1988 (prácticamente tres décadas), y durante todo ese tiempo la situación de incertidumbre persistió. Los físicos se convencieron de que existía un verdadero problema. Un periodista de *The New York Times* lo describió como «uno de los resultados más desconcertantes y embarazosos de la ciencia del siglo xx». En 1978 la situación era tan confusa que no se veía salida alguna al problema. La infinidad de pruebas a las que fue sometido el equipo experimental de Davis convenció a la mayoría de físicos de que las medidas eran correctas. La revisión de la teoría de Bahcall y todos sus cálculos por parte de los físicos teóricos también les convenció de la corrección de los mismos. Se decidió entonces diseñar nuevos experimentos, muy diferentes a los que existían hasta entonces, que pudiesen confirmar o desestimar los resultados de Davis. Se pensaba que solo de este modo se podría resolver finalmente el *problema de los neutrinos solares*. Este es el nombre que se dio al conflicto entre el número de neutrinos solares que se esperaba encontrar y los que realmente se detectaban. Muy pocos físicos podían imaginar en aquellos años que el verdadero problema residía en la propia naturaleza de los neutrinos, y no en el modelo solar ni en los métodos de detección. Una vez más, la propuesta realizada por el físico italiano Bruno Pontecorvo en 1968 resultó reveladora de su genio. En ella estaba la solución al problema del déficit de neutrinos solares. Sin embargo, muy pocos supieron apreciar lo que Pontecorvo propuso. Hubieron de transcurrir aún muchos años para que la idea del físico italiano que desertó a la Unión Soviética se alzase en todo su valor como la revelación que verdaderamente fue.

El sabor y otras extrañas propiedades

A medida que se avanzaba en la investigación sobre la extraña naturaleza del neutrino, las sorpresas se iban sucediendo una tras otra. A la predilección que parecía mostrar entre derecha e izquierda siguió su polifacética personalidad. Eran varios los tipos de neutrinos, y lo más asombroso, unos parecían transformarse en otros.

Los neutrinos no han dejado de depararnos sorpresas desde su descubrimiento experimental. Al mismo tiempo que Davis y Bahcall dedicaban todas sus energías a la captura de los neutrinos solares y a la consiguiente descripción de cómo funciona el Sol, otras evidencias experimentales fueron mostrando paulatinamente extrañas propiedades. El neutrino presentaba un comportamiento muy distinto al resto de las partículas subatómicas. Su descripción resultaba incomprensible en ocasiones, y ello obligó a los físicos a tomar decisiones muy drásticas y a realizar propuestas muy atrevidas. Todas estas ideas y nuevas evidencias fueron conformando lo que años después se denominaría el *modelo estándar* de la física de partículas, el mejor marco conceptual y matemático de que disponemos en la actualidad para explicar el comportamiento del mundo subatómico y que describe las relaciones entre las partículas elementales de la materia y las interacciones fundamentales. Sin embargo, la historia no terminó aquí. La propia naturaleza del neutrino obligó a ir más allá, a traspasar los propios límites del modelo estándar.

LA RADIACIÓN CÓSMICA Y SUS CONSECUENCIAS

A mediados de la década de 1930 los físicos se encontraban bastante satisfechos con el estudio del mundo subatómico. Básicamente, la materia estaba constituida a partir de los protones y neutrones que conformaban los núcleos atómicos y los electrones que se encontraban en niveles externos. Esta configuración de los átomos estaba perfectamente asentada en el marco de la mecánica cuántica desarrollada años antes. Además, existía ya una teoría cuántica de la interacción radiación-materia que, aun con problemas por resolver, explicaba de modo razonable los procesos de emisión y absorción de radiación. Por último, se habían descubierto también los positrones, la primera evidencia experimental de las antipartículas propuestas por Dirac. En los años siguientes la situación cambió de modo radical.

A finales de 1930 y durante toda la década de 1940, los físicos comenzaron el estudio de la *radiación cósmica*, es decir, las partículas subatómicas procedentes del espacio exterior. Estas partículas (principalmente protones), con una enorme energía, interaccionaban con los átomos de la atmósfera terrestre produciendo toda una cascada de radiación y nuevas partículas que podían detectarse. En pocos años, los físicos vieron cómo se pasaba de una situación de simplicidad y armonía, a un caos donde cada nuevo día era portador de más y más partículas. Del innumerable número de partículas que se descubrieron durante estos años, dos resultaron esenciales en la posterior historia del neutrino: los *muones* y los *piones*.

En 1935 el físico japonés Hideki Yukawa (1907-1981) propuso la existencia de una partícula de masa intermedia, aproximadamente 300-400 veces más pesada que el electrón, que era la responsable de la interacción fuerte existente entre protones y neutrones en el interior de los núcleos atómicos. La propuesta de Yukawa se basaba en la teoría de la interacción electromagnética, y al igual que esta se explicaba gracias al intercambio de fotones (los *cuantos* de la radiación), la interacción fuerte estaba mediada por unas nuevas partículas mucho más pesadas. Aun cuando Yukawa mostró una enorme cautela en su propuesta, la

búsqueda de la «nueva» partícula comenzó inmediatamente. En 1937 se descubrió una nueva partícula a partir del análisis de los rayos cósmicos. Aunque en un principio se identificó con la partícula propuesta por Yukawa, en muy poco tiempo hubo de abandonarse tal imagen. La nueva partícula descubierta, a la que se dio el nombre de *muon* (se representa por μ), tenía una masa 200 veces superior a la del electrón y presentaba carga eléctrica negativa (posteriormente se descubriría también el muon positivo). Sin embargo, el muon no participaba en la formación de núcleos atómicos; de hecho, no parecía sentir en absoluto la interacción fuerte. Este comportamiento lo hacía incompatible con la partícula propuesta por Yukawa. A todos los efectos, el muon parecía ser un electrón pesado cuya razón de ser ningún físico atinaba a comprender. Algunos años después, en 1947, se descubrió una nueva partícula, algo más pesada que el muon, y cuyas propiedades coincidían con la propuesta por Yukawa. Se la denominó *pion* (representada por π), y se comprobó que aparecía en tres posibles estados de carga: positiva, negativa y neutra.

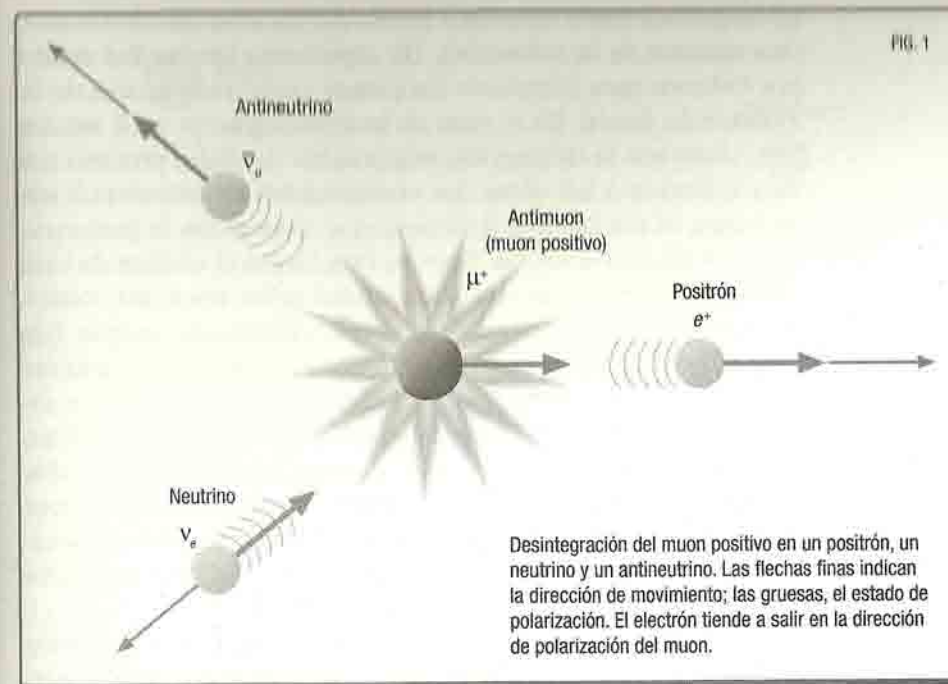
El estudio de los muones y piones tuvo un enorme impacto en el propio conocimiento de los neutrinos. Piones y muones eran fáciles de producir y ambas partículas se desintegraban al cabo de un cierto tiempo. De hecho, se comprobó que el pion al desintegrarse daba lugar en la mayoría de las ocasiones a un muon y un neutrino.

LA DESINTEGRACIÓN DEL MUON

El muon, resultante de la desintegración del pion, se desprendía a su vez de parte de su energía produciendo en el estado final un electrón. Este proceso parecía plausible con la imagen del muon como un electrón pesado. Los físicos de la época visualizaban el muon como si se tratase de un estado excitado del electrón. En esta situación, la desintegración del muon en un electrón no era más que el reflejo del decaimiento de un estado excitado al estado fundamental. La diferencia de energía entre ambos se de-

bía emitir en forma de radiación electromagnética. La imagen era muy clara, pero las evidencias experimentales no lo fueron. La desintegración del muon en un electrón y un fotón implicaba que, una vez medida la radiación electromagnética emitida, la energía del electrón debía venir dada por un valor fijo. Por el contrario, todas las evidencias experimentales de aquellos años mostraban que el número de electrones que se *detectaban* era considerablemente menor que los que deberían aparecer.

Fermi propuso este problema como proyecto de tesis doctoral al joven Jack Steinberger (1921). Ambos pensaban que el problema tenía solución si junto al electrón se emitían dos neutrinos. Obsérvese que el argumento no era tan distinto al que dio origen al postulado del neutrino por parte de Pauli. Si la energía final se repartía entre tres partículas, electrón y dos neutrinos, el electrón podía ser emitido con valores diversos contenidos en un rango continuo de energías. Esto explicaría que se detectasen menos electrones de los que se esperaban. Sin embargo, era necesario realizar un experimento en el que se pusiera de manifiesto de modo incuestionable que la desintegración del muon tenía lugar como proponían Fermi y Steinberger. El experimento fue realizado por este último en 1948 confirmando que el muon se desintegraba en un electrón acompañado de dos partículas neutras y con masas muy pequeñas (figura 1). Puesto que los muones y electrones eran partículas de espín 1/2 (fermiones), las dos partículas neutras también debían ser fermiones. Así pues, todo parecía indicar que se trataba de dos neutrinos. Recuérdese que en 1948 aún faltaban ocho años para que se detectase experimentalmente el neutrino. El análisis de Steinberger introducía, sin embargo, una cuestión esencial: ¿por qué los dos neutrinos emitidos no se aniquilaban produciendo radiación electromagnética? Si los neutrinos emitidos eran idénticos tal posibilidad existía, y por tanto, debía ser posible *observar* la desintegración de los muones en electrones y fotones. Pero nunca se observó tal proceso. ¿Existía alguna propiedad fundamental que lo prohibiese? Una vez más, fue Pontecorvo quien proporcionó todas las claves para entender qué estaba sucediendo.



LA PARIDAD Y LA INTERACCIÓN DÉBIL

A mediados de la década de 1950 la teoría de Fermi de la desintegración beta se encontraba perfectamente asentada. Era capaz de reproducir las evidencias experimentales a bajas energías. Sin embargo, ¿qué sucedía a energías más altas? En aquellos años los físicos eran ya conscientes de las limitaciones de la teoría de Fermi. Para energías muy altas, las predicciones de Fermi resultaban absurdas. La probabilidad de determinados procesos resultaba superior al 100%. Este resultado era una consecuencia de algunas de las suposiciones implícitas en la propia teoría. La imagen de que las cuatro partículas implicadas en la desintegración beta, neutrón, protón, electrón y neutrino, ocupaban la misma posición en un instante determinado era insostenible, y profundamente inconsistente con la teoría cuántica de la interacción radiación-materia. Recuérdese que la interacción elec-

tromagnética venía descrita a través del intercambio de fotones (los cuantos de la radiación). Un argumento similar fue usado por Yukawa para introducir los piones como mediadores de la interacción fuerte. En el caso de la desintegración beta, estaba muy claro que la interacción responsable de dicho proceso era muy diferente a las otras dos mencionadas anteriormente; sin embargo, el mecanismo de interacción necesitaba la presencia de partículas mediadoras. Solo de esta forma el análisis de esta nueva interacción, a la que se denominó *débil*, resultaba consistente con el marco general de la teoría cuántica de campos. Las propiedades de las partículas *mediadoras* permitían explicar las evidencias de la interacción débil eliminando los resultados absurdos que surgían de la teoría de Fermi a energías muy altas. Con el paso de los años, se identificaron las partículas mediadoras de la interacción débil, a las que se denominaron *bosones vectoriales* cargados, W^+ , W^- , y neutro, Z^0 . En la figura 2 se muestra el diagrama correspondiente al proceso de desintegración beta con el intercambio de un bosón cargado.

Un segundo aspecto que surgió del estudio de la interacción débil fue la *violación de la paridad*. Este resultado fue completamente inesperado y reveló una nueva y *extraña* propiedad de los neutrinos. Se denomina *transformación de paridad* a cualquier transformación bajo inversión espacial, es decir, cambio de los vectores que determinan la posición de las partículas. Hasta el año 1956 la mayoría de los físicos estaban convencidos de que todos los procesos que tenían lugar en la naturaleza conservaban estrictamente la paridad. En otras palabras, la probabilidad de que tuviese lugar un proceso determinado no cambiaba al modificar la dirección de movimiento de las partículas que intervenían en dicho proceso. De modo muy gráfico, los procesos que tenían lugar a derechas eran igual de probables que si lo hiciesen a izquierdas. Sin embargo, la situación cambió completamente cuando dos jóvenes físicos de origen chino, Tsung-Dao Lee (1926) y Chen Ning Yang (1922), descubrieron que muchos procesos gobernados por la interacción débil no conservaban la paridad. Más aún, propusieron un experimento específico para poner en evidencia dicha violación de paridad. El experimento,

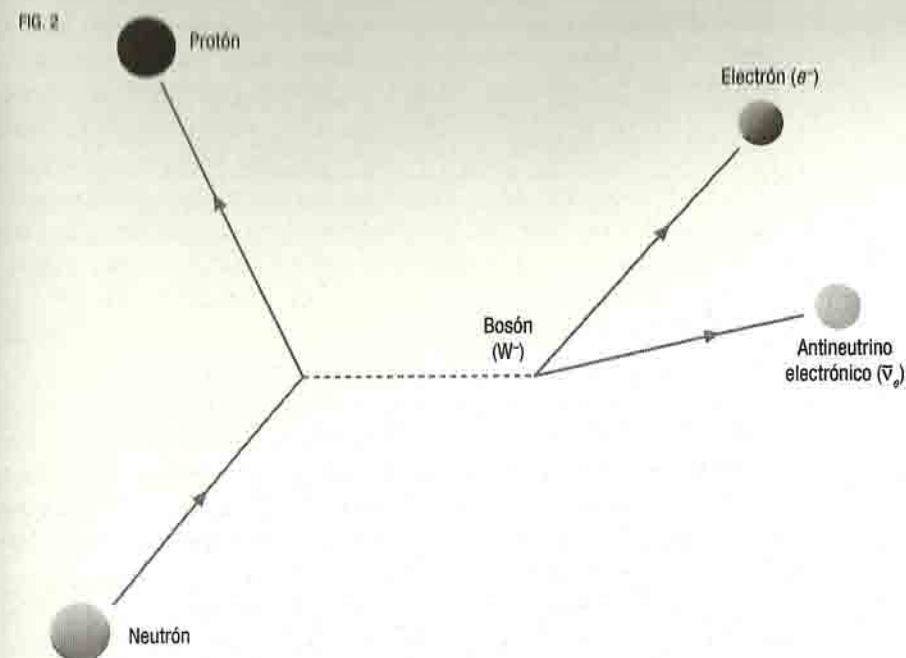
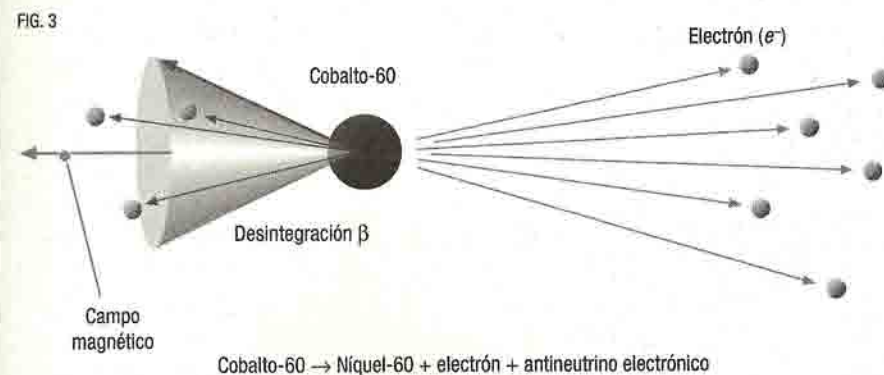


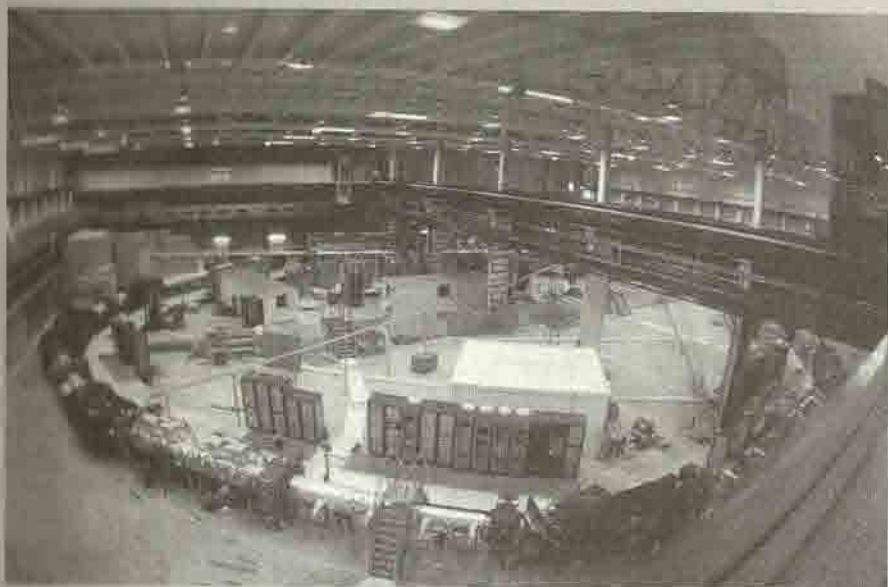
Diagrama que representa el decaimiento β con la emisión de la partícula mediadora de la interacción débil: el bosón W .



Resultado del experimento del equipo de Chien-Shiung Wu sobre violación de paridad en cobalto-60. Los electrones se emiten preferentemente en dirección opuesta al campo magnético.

LA UNIFICACIÓN ELECTRODÉBIL

La fuerza electromagnética, descrita perfectamente por la electrodinámica cuántica (QED), y la fuerza débil, descrita en un principio por la teoría de Fermi y posteriormente modificada para incluir la violación de paridad, parecían teorías muy distintas: la intensidad de la interacción era muy diferente, los portadores de la fuerza completamente distintos, e incluso, las propiedades que debían conservarse o podían violarse también diferían. A pesar de ello, en la década de 1970 surgió la teoría electrodébil desarrollada por S. Weinberg (1933), A. Salam (1926-1996) y S.L. Glashow (1932), que proporcionaba una descripción cuántica unificada de las dos fuerzas: electromagnética y débil. Una de las predicciones de la nueva teoría era que debían existir cuatro partículas mediadoras de la interacción: el fotón para la electromagnética y tres bosones para la débil. De estos últimos, dos debían ser cargados y uno neutro. La confirmación experimental del bosón neutro tuvo lugar en el CERN en 1983. Uno de los problemas fundamentales de la teoría electrodébil fue que asignaba a los cuatro bosones mediadores de la interacción una masa nula, algo en completa contradicción con las evidencias experimentales. ¿Cómo podían adquirir masa dichos bosones? La respuesta estaba implícita en el mecanismo de Higgs, y recibió un enorme espaldarazo con el descubrimiento del bosón de Higgs en 2013. Weinberg, Salam y Glashow compartieron el premio Nobel en 1979.



En el CERN, el Acumulador de Antiprotones (AA), sometido a transformaciones drásticas con los años, y mostrado en esta foto, fue decisivo para las colisiones que condujeron al hallazgo del bosón neutro en 1983.

que fue realizado por vez primera el 27 de diciembre de 1956 por el equipo de la profesora Chien-Shiung Wu, consistió en analizar el proceso de desintegración beta en el caso del núcleo de cobalto-60 sometido a un fuerte campo magnético. Los resultados fueron incuestionables: los electrones se emitían preferentemente en una dirección determinada (figura 3).

Los neutrinos solo interactúan en estados definidos de polarización (véase el recuadro de la pág. 95). Esta propiedad permite explicar por qué el pion se desintegra fundamentalmente en muones y neutrinos, mientras que el decaimiento directo en electrones y neutrinos solo sucede en casos excepcionales (uno de cada diez mil). Las primeras evidencias experimentales fueron obtenidas por Steinberger y sus colaboradores en 1958. Detectaron más de cincuenta mil señales de muones por solo seis de electrones. La explicación de este hecho está relacionada con la enorme diferencia de masas entre el electrón y el muon. De hecho, en el límite en el que la masa del electrón fuese nula, la estructura de la interacción débil implica que solo electrones de polarización determinada pueden acoplarse con los neutrinos emitidos. Sin entrar en detalles, esta situación sería incompatible con la conservación del momento angular, y consiguientemente, el proceso descrito nunca podría tener lugar. Por el contrario, el pequeño valor de la masa del electrón justifica que el proceso sea posible aunque esté muy inhibido respecto al caso de emisión de muones.

El estado definido de polarización del neutrino (se denomina *helicidad*) parecía ser la razón que permitía explicar el fenómeno de violación de paridad. Sin embargo, ¿cómo estar completamente seguros? Era necesario medir de modo directo la polarización del neutrino, y ello fue posible con el experimento realizado en 1958 por M. Goldhaber, L. Grodzings (1926) y A.W. Sunyar (1920-1986). En el mismo, núcleos de europio (Eu) capturaban un electrón transformándose en núcleos de samario (Sm) con la emisión de neutrinos. El samario quedaba en un estado excitado que inmediatamente decaía al estado fundamental emitiendo radiación electromagnética (un fotón). La medida de la polarización del fotón permitió determinar la helicidad del neutrino.

Los resultados experimentales confirmaron la teoría propuesta el año anterior, 1957, en la que solo neutrinos con helicidad negativa y antineutrinos con helicidad positiva participaban en la interacción débil.

PONTECORVO Y LA MÚLTIPLE PERSONALIDAD DEL NEUTRINO

En solo dos años el neutrino había mostrado propiedades ciertamente extrañas y difíciles de imaginar antes: estados de helicidad definida y violación de la paridad. La teoría de la interacción débil también experimentó avances importantes con la modificación de la estructura de la interacción. Sin embargo, aún quedaba un problema esencial por resolver, el de la desintegración de los muones. ¿Por qué estos decaían en electrones y dos neutrinos? ¿Por qué nunca se había observado la desintegración de los muones en electrones y fotones? Desde que en 1953 se introdujo el número leptónico para explicar por qué tenían lugar ciertas reacciones y otras no, estaba claro que el proceso de decaimiento del muon era el siguiente: $\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$. Obsérvese que el número leptónico se conserva en la reacción. La paradoja era que en el estado final aparecían un neutrino y un antineutrino, y uno de los resultados de la teoría cuántica relativista es que partículas y antipartículas se aniquilan produciendo radiación electromagnética. Así pues, el problema real no era que la desintegración del muon en un electrón y un fotón fuese un proceso muy raro, sino que, como señaló Pontecorvo, dicho proceso, $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$, debería ser el más común (el término γ denota al fotón). ¿Por qué no era así?

Pontecorvo fue, una vez más, el primer físico en formular las preguntas adecuadas, preguntas que le condujeron a las respuestas correctas. La pregunta básica fue la siguiente: ¿corresponden el neutrino y el antineutrino que aparecen en la desintegración del muon a la misma partícula? En otras palabras, los neutrinos que aparecen al desintegrarse los piones en muones, ¿son idénticos a los que surgen en el proceso de desintegración beta en el que se crean electrones? Pontecorvo exploró esta

LOS NEUTRINOS Y SU ESTADO DE POLARIZACIÓN

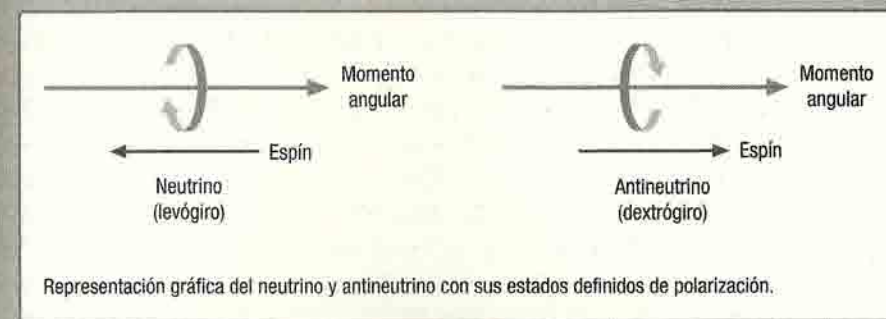
En 1957 Leon Lederman (1928) y sus colaboradores realizaron un experimento en el que se puso de manifiesto la violación de la paridad en la interacción débil. La idea fue detectar los electrones originados a partir de la desintegración de los muones. Primero se generaban piones a partir del choque de protones muy energéticos con núcleos diversos. Los piones son partículas de espín cero que decaen por interacción débil en muones y neutrinos, ambas partículas de espín $1/2$. Así, la conservación del momento angular implicaba que el muon y el neutrino debían producirse con direcciones de espín distintas.

Los resultados de Lederman

Pero ¿cómo medir el sentido de giro del muon, partícula que se desintegraba en electrones y dos neutrinos? Detectando en qué dirección surgían los electrones finales. En un proceso en el que la paridad se conservase el número de electrones emitidos en una dirección y la opuesta sería similar. Si no se conservase, la diferencia se pondría de manifiesto. Los resultados fueron incuestionables: el número de electrones que iban hacia delante (dirección de propagación del muon) era más del doble de los que se detectaban hacia atrás. No solo la paridad no se conservaba sino que era destruida por completo. La razón era la proyección del espín, es decir, el sentido de giro asociado al neutrino. Al contrario de los electrones, protones y demás fermiones con masa, los neutrinos solo se manifestaban en un estado de proyección de espín definido.

Estados de polarización

Una partícula de espín $1/2$ admite dos posibles estados de polarización, llamémosles positivo y negativo o izquierda y derecha. Ambos estados son igualmente probables. Sin embargo, la situación es muy distinta con los neutrinos: estos solo se presentan en un estado de polarización determinado (véase la figura). Esto explica que el muon resultante de la desintegración del pion también muestre un estado de polarización definido, contrario al del neutrino, para que el momento angular total se conserve. El hecho de que el muon tenga un sentido de giro dado (*estado definido de polarización*) explica que los electrones salgan emitidos en una dirección determinada.



idea en detalle y concluyó que, al igual que electrones y muones son partículas diferentes, los neutrinos que aparecen ligados a ellos también son distintos. De este modo, Pontecorvo introdujo una clara simetría por parejas. Por una parte, se tenía al electrón junto al neutrino que le acompaña, y por otra, al muon con su neutrino correspondiente. Idéntica analogía se aplicaría a las antipartículas. La propuesta de Pontecorvo significaba de hecho que los neutrinos debían aparecer en diversas clases. Se introdujo el término *sabor* para denotar esta propiedad, y se denominó *neutrinos electrónicos* a aquellos asociados al electrón (representados por ν_e) y *neutrinos muónicos* (ν_μ) a los del muon. Por tanto, si los neutrinos y antineutrinos emitidos en la desintegración del muon tenían un sabor distinto, esto explicaba el hecho de que no se aniquilasen produciendo radiación electromagnética (figura 1). Una partícula no podía aniquilarse con la antipartícula de otra. La diferenciación en la propiedad de sabor permitía extender la propiedad de conservación del número leptónico asociado a cada sabor. Así pues, existiría un *número leptónico electrónico* y otro *muónico* (se conocen como *números leptónicos por familia*). Solo eran posibles aquellos procesos en los que se conservaba el número leptónico para cada sabor. He aquí una clara justificación de que el muon no pudiese decaer en un electrón y un fotón. En dicho proceso cambiaría el sabor y, por consiguiente, se modificaría el número leptónico por familia.

La hipótesis de Pontecorvo era muy ingeniosa, pero ¿cómo demostrar que era cierta? ¿Cómo estar seguros de que los neutrinos aparecían efectivamente en varios sabores distintos? Pontecorvo desarrolló sus ideas en un artículo que publicó en ruso en la *Revista Soviética de Física* en 1959. El trabajo pasó completamente inadvertido hasta que a finales del año siguiente, 1960, apareció su traducción al inglés. El físico italiano no se limitó a exponer las ideas previas sino que explicó en detalle cómo podría verificarse en la práctica si tales ideas eran correctas. En otras palabras, el artículo de Pontecorvo contenía una descripción del experimento en el que se podría poner en evidencia la múltiple personalidad del neutrino.

La propuesta de Bruno Pontecorvo, la existencia de diversos tipos de neutrinos, implicaba reconocer que el neutrino tenía memoria de su origen. Esto significaba que si un neutrino había surgido junto a un electrón, cuando posteriormente interaccionase con la materia siempre daría lugar a un electrón. Análogamente, si el neutrino se había creado junto al muon, esta sería la memoria que con-

servaría, y al transformarse en una partícula cargada, esta sería siempre el muon. El sabor del neutrino determinaba completamente el tipo de leptón (electrón o muon) que podía surgir. Esta fue la idea central que proporcionó a Pontecorvo la clave para desarrollar su método operativo. Todo lo que se necesitaba era producir neutrinos de un sabor determinado y «observar» qué ocurría cuando dichos neutrinos interaccionaban con la materia. La idea parecía simple, pero para llevarla a cabo era necesario producir neutrinos a muy alta energía. Solo de este modo, la interacción entre los neutrinos y los núcleos podría producir señales lo bastante intensas que pudiesen ser detectadas claramente.

Pontecorvo propuso el uso de aceleradores para producir piones de alta energía a partir de la colisión de un haz de protones con un cierto material. Los piones se desintegrarían fundamentalmente en muones y neutrinos de alta energía. Después, la práctica totalidad de muones se absorberían mediante el uso de un gran escudo metálico, mientras que los neutrinos seguirían su camino sin haber sufrido casi ninguna perturbación. Finalmente, estos neutrinos se harían incidir sobre un gran objetivo, donde un sistema adecuado de detección permitiría *detectar* aquellos que hubiesen interaccionado. ¿Qué se esperaba medir? Los neutrinos, al interaccionar con los núcleos atómicos del medio, producirían electrones y/o muones. En el caso en que todos los neutrinos fuesen iguales, es decir, no existiese ninguna diferenciación asociada al sabor, se detectaría aproximadamente el mismo número de electrones que de muones. Por el contrario,

Las matemáticas son mucho más que un lenguaje para tratar con el mundo físico. Es una fuente de modelos y abstracciones que nos permitirán obtener nuevos conocimientos sobre la forma en que funciona la naturaleza.

MELVIN SCHWARTZ

Revertía fácilmente a mi estado salvaje, es decir, la experimentación.

JACK STEINBERGER

El detector. Este resultado sería una muestra concluyente de la diferencia entre los distintos tipos de neutrinos, es decir, de la múltiple personalidad del mismo.

EL SABOR DE LOS NEUTRINOS: EL EXPERIMENTO

A principios de 1960 solo existían dos instalaciones en las que podía llevarse a cabo el experimento propuesto por Pontecorvo. Una era Brookhaven en Estados Unidos y la otra el CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, o Centro Europeo de Investigaciones Nucleares) en Ginebra (Suiza). Lamentablemente, Pontecorvo no tuvo oportunidad de llevar a cabo su propuesta y, como ya había sucedido con anterioridad, fueron otros físicos los que recibieron la recompensa del descubrimiento.

En 1960 el físico estadounidense Melvin Schwartz (1932-2006) publicó un breve artículo en el que desarrolló las ideas básicas para poner de manifiesto los distintos sabores del neutrino. La propuesta de Schwartz era muy parecida a la que había desarrollado Pontecorvo el año previo. De hecho, Schwartz hizo mención explícita al trabajo del físico italiano cuya versión en inglés apareció algunos meses antes. Como ya se ha mencionado, los piones se desintegraban básicamente en muones y neutrinos, y estos últimos debían guardar memoria de su identidad. La cuestión era: ¿cómo se podían realizar medidas que pusiesen de manifiesto la identidad del neutrino?

En los dos años siguientes un equipo formado por los físicos L. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger y varios estudiantes llevó a cabo el experimento haciendo uso de un nuevo acelerador que acababa de construirse en Brookhaven. Protones acelerados a energías muy altas (15 GeV) se hicieron incidir sobre

si, como había previsto Pontecorvo, el neutrino producido en la desintegración del pión llevaba asociado el sabor muónico, solo se observarían muones tras la interacción entre los neutrinos y los núcleos atómicos en

AL FINAL FUERON TRES

En 1976 se descubrió una nueva partícula a la que se denominó *tau* (τ). Aunque su masa era unas 3500 veces superior a la del electrón, se trataba simplemente de un tercer leptón cargado. Se concluyó entonces que debía existir un nuevo tipo de neutrino al que se denominó *neutrino tauónico*. La confirmación experimental no resultó fácil. Dada la enorme masa del leptón tau, era necesario disponer de neutrinos con energías muy altas, algo que solo pudo conseguirse con el gran colisionador electrón-positrón (LEP, *Large Electron-Positron Collider*) del CERN. La observación directa del neutrino τ tuvo lugar en el año 2000 en el laboratorio Fermilab (Chicago).

Aún restan preguntas

A finales de la década de 1980, diversos experimentos sobre la desintegración del bosón Z^0 indicaron que solo existían tres tipos de neutrinos ligeros. Este resultado parecía poner límite al número de leptones cargados asociados. Además, establecía una clara simetría con las tres familias correspondientes a los quarks. Sin embargo, ¿por qué solo tres familias? ¿es posible que existan neutrinos pesados, con helicidad distinta, que no sientan la interacción débil? Todavía no tenemos respuestas claras, pero el hecho de que el neutrino apareciese con distintas personalidades iba a resultar determinante para comprender el problema con el que habían topado Davis y Bahcall en su estudio del Sol.

| | Electrón | Muon | Tau |
|--------------|----------|------|-----|
| Leptón | | | |
| Neutrino | | | |
| Antileptón | | | |
| Antineutrino | | | |

Representación de las tres familias de leptones: electrón, muon y tau, y los correspondientes neutrinos. Análogamente para las antipartículas.

núcleos de berilio produciéndose una enorme cantidad de piones que se desintegraban rápidamente en muones y neutrinos. Los muones se absorbían por una barrera de acero de trece metros de espesor, y los neutrinos se hacían incidir sobre un gran objetivo constituido por unas diez toneladas de aluminio. Durante varias semanas billones de neutrinos de gran energía atravesaron el bloque de aluminio sin dejar rastro alguno. Sin embargo, algunos interaccionaron con los núcleos de aluminio dando lugar a partículas cargadas que pudieron detectarse. La totalidad de las señales observadas correspondieron a muones. Este resultado indicaba de modo inequívoco que todos los neutrinos que habían interaccionado con el aluminio tenían el sabor *muónico*. Ni una sola señal correspondió al caso de electrones. La evidencia experimental indicaba que ambos tipos de neutrinos eran claramente distintos. En 1988, veintiséis años después del experimento, Schwartz, Lederman y Steinberger fueron galardonados con el premio Nobel. La distinción de los neutrinos por el sabor resultó fundamental en el posterior desarrollo del modelo estándar.

Cambios de personalidad: las oscilaciones

El problema de los neutrinos solares persistió durante muchos años. En los años siguientes, el déficit de neutrinos se convirtió en un problema general: independientemente de su origen, siempre se detectaban menos neutrinos de lo esperado. Resultaba evidente que la respuesta al problema había que buscarla en su propia naturaleza.

El experimento de Davis y los cálculos de Bahcall habían conducido a un callejón sin salida. Nadie había conseguido encontrar ningún error, ni en los cálculos teóricos ni en el procedimiento experimental. Se extendía entre la comunidad de físicos la idea de que existía un problema real con los neutrinos, un problema para el cual no parecía encontrarse respuesta alguna, y todo ello a pesar del enorme avance que se había conseguido en la descripción de sus singulares propiedades. Nadie prestó especial atención al nuevo trabajo de Pontecorvo y su propuesta de que el neutrino pudiese modificar su personalidad. Resultaba demasiado extraño para ser aceptable y, sin embargo, la historia del neutrino había sido una sucesión de hechos a cada cual más desconcertante.

En todo caso, era necesario corroborar o refutar los resultados de Davis, y para ello el único camino era diseñar y realizar nuevos experimentos que permitiesen desencallar la actual situación y seguir avanzando en el conocimiento de los neutrinos. Este fue un empeño en el que el propio Davis, y también Bahcall, no dejaron de insistir. A fin de cuentas, se había puesto en cuestión el prestigio y capacidad de ambos físicos.

DETECTANDO NEUTRINOS SOLARES CON GALIO

Uno de los inconvenientes del uso de cloro en el experimento de Davis era que este no permitía la detección de aquellos neutrinos menos energéticos asociados a la cadena pp, el proceso dominante en el Sol (véase el capítulo 3). Era necesario diseñar un nuevo experimento donde el cloro se sustituyese por un nuevo elemento que permitiese la detección de estos neutrinos. El material adecuado era el galio que, tras interactuar con los neutrinos, daba lugar a un isótopo radiactivo del germanio (un isótopo es un átomo de un mismo elemento que tiene diferente número de neutrones en el núcleo). La gran ventaja del galio frente al cloro es que la reacción previa podía tener lugar para neutrinos con menor energía. En otras palabras, el uso de galio permitiría detectar neutrinos originados directamente en la cadena pp. De este modo, no solo aumentaría considerablemente el número de señales detectadas, sino que estas mismas corresponderían a un rango mucho más amplio de energías. El experimento con galio podía proporcionar una respuesta al problema de los neutrinos solares.

Durante cinco años Davis y Bahcall desarrollaron el proyecto intentando encontrar financiación para el mismo. Desde el punto de vista científico nunca se cuestionó su interés ni su potencial para comprender la naturaleza más interna del Sol. Sin embargo, nunca pudo llegarse a un acuerdo sobre quién se encargaría de su financiación. El galio no era tan económico como el cloro, y el experimento requería una cantidad varias veces superior a la producción mundial del mismo en aquellos años. Todo ello explica que el experimento con galio nunca se llevase a cabo en Estados Unidos. Otra profunda decepción más para sus grandes impulsores: Davis y Bahcall.

No obstante, el proyecto no cayó en el olvido y muchos años después, en la década de 1990, dos grandes colaboraciones científicas desarrollaron los detectores de galio y comenzaron a tomar medidas. Los dos proyectos fueron GALLEX y SAGE. El primero, GALLEX (*GALLium Experiment*), fue básicamente una colaboración de instituciones europeas. El experimento se construyó en las instalaciones subterráneas del Laboratorio

Nacional del Gran Sasso en el centro de Italia. El experimento estuvo funcionando de forma ininterrumpida desde 1991 hasta 1997, continuando después con la colaboración GNO (*Gallium Neutrino Observatory*) hasta 2003. El segundo proyecto, SAGE (*Soviet American Gallium Experiment*), fue, como su nombre indica, una colaboración entre instituciones de Estados Unidos y la Unión Soviética. El experimento se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Baksan en el Cáucaso y estuvo funcionando desde 1990 hasta 2007.

Los datos de ambos experimentos fueron totalmente consistentes entre sí, consiguiéndose además una mejora apreciable en la precisión de los mismos en comparación con los previos de Davis. Sin embargo, lo verdaderamente interesante de GALLEX y SAGE es que las señales producidas (los neutrinos solares detectados) eran solo aproximadamente la mitad de las que la teoría predecía. Un significativo número de neutrinos solares seguía estando ausente, y esta ausencia afectaba a neutrinos de muy diversas energías, tanto aquellos generados a partir del berilio como los producidos directamente en la cadena pp. El problema de los neutrinos solares seguía persistiendo, y este resultado fue una clara reivindicación del trabajo de Davis y Bahcall. Reivindicación que no había hecho más que empezar.

LOS NEUTRINOS DE KAMIOKANDÉ

A finales de la década de 1970 el modelo estándar estaba perfectamente asentado. No obstante, muchos físicos estaban convencidos de que dicho modelo era solo una teoría efectiva cuyo grado de validez dependía de la energía que se investigase. Por consiguiente, a principios de la década de 1980 comenzaron a desarrollarse diversas teorías que intentaban encontrar una descripción unificada de todas las interacciones de la naturaleza. Algunas de estas teorías, que se denominaron *teorías de gran unificación*, implicaban que determinados procesos, prohibidos en el esquema del modelo estándar, podían tener lugar. Uno de ellos era la desintegración del protón. Las profundas implica-

ciones que podían derivarse de este proceso explican que se diseñasen experimentos que pudiesen ponerlo en evidencia. Con este objetivo se construyó en 1983 el detector Kamiokande (*Kamioka Nucleon Decay Experiment*) que se situó en una mina de la compañía japonesa Kamioka a un kilómetro de profundidad en el centro de Japón. El detector consistía en un enorme tanque con tres mil toneladas de agua *ultrapura* y rodeado por unos mil tubos fotomultiplicadores. El objetivo era detectar las partículas resultantes de la desintegración del protón haciendo uso del denominado *efecto Cherenkov*.

Al poco tiempo de comenzar las medidas, los físicos se convencieron de que era imposible detectar la desintegración del protón. La señal debida a este proceso era demasiado débil en comparación con las que inducían los rayos cósmicos. Estos interactuaban con los átomos en la atmósfera produciendo una ingente cantidad de neutrinos que entraban en el detector produciendo señales similares a las que podían ser debidas a la desintegración del protón. Así pues, el ruido de fondo debido a los neutrinos invalidaba completamente el equipo experimental para el objetivo que se había diseñado. Sin embargo, no resultó difícil darse cuenta de que el detector, aunque no pudiese discernir la desintegración de un protón, sí podía detectar neutrinos. Por primera vez se disponía de un equipo experimental, del todo distinto a las técnicas del cloro y galio, que permitía «observar» directamente a los neutrinos. En lugar de inferir la presencia de estos por el cambio producido en el material del detector, *i.e.*, la transformación del cloro en argón o del galio en germanio y la posterior desintegración de los núcleos radiactivos producidos, en el nuevo detector la presencia del neutrino se infería de su choque directo con algunos de los electrones del medio. El neutrino, tras colisionar con el electrón, le transfería energía suficiente para que pudiese desplazarse en el agua a una velocidad superior a la de la luz en dicho medio. El electrón *superlumínico* produce un cono de luz de Cherenkov que puede detectarse en los fotomultiplicadores dando lugar a un anillo luminoso. El tamaño del anillo depende de la velocidad del electrón, que a su vez depende de la energía del neutrino que ha chocado con él. Así pues, el detec-

tor Kamiokande no solo permitía la detección de neutrinos, sino que también podía proporcionar información específica sobre su energía y su dirección de procedencia. Además, se registraba en qué momento tenían lugar las señales, es decir, se podía conocer el instante en que el neutrino interactuaba con el electrón.

Kamiokande estuvo operativo desde 1987 a 1995. Durante todo este tiempo se detectaron neutrinos procedentes del Sol cuyas energías eran considerablemente más altas que los valores mínimos requeridos en los experimentos basados en detectores radioquímicos: Davis, GALLEX y SAGE. Esto significa que Kamiokande solo podía detectar neutrinos procedentes de la reacción del boro-8, el proceso menos probable en la producción de energía en el Sol. Pudo comprobarse que el número de neutrinos procedentes del Sol disminuía al aumentar la energía de los mismos, un resultado predicho por la teoría de Bahcall que se vio de este modo reafirmada por las evidencias experimentales. Sin embargo, solo seguían llegando alrededor de la mitad de neutrinos de los que el modelo solar de Bahcall había predicho. La situación era verdaderamente desconcertante. Cuatro experimentos diferentes usando técnicas distintas conducían a la misma conclusión: un claro déficit en el número de neutrinos procedentes del Sol respecto a la predicción teórica. Se confirmaba que el problema no podía estar asociado al procedimiento de medida; Davis estuvo en lo cierto desde el primer momento. Pero ¿qué decir de los cálculos y predicciones de Bahcall? Las nuevas evidencias experimentales dejaban muy pocas opciones; o la teoría de Bahcall no proporcionaba el valor correcto del número de neutrinos generados en el Sol, o la propia naturaleza del neutrino y su *extraño* comportamiento permitían que estos desapareciesen o se transformasen durante el trayecto desde el Sol a la Tierra. Esta situación de incertidumbre y, sobre todo, de profunda decepción para Bahcall, estaba a punto de sufrir un cambio espectacular con la nueva versión del detector japonés, conocido como SuperKamiokande, que comenzó a operar en 1996 y que, situado a un kilómetro bajo tierra, en la mina de Mozumi, tendría una estructura cilíndrica de 39 m de ancho y 41 m de alto.

NEUTRINOS ATMOSFÉRICOS

Como ya se explicó en el capítulo 4, los rayos cósmicos incidentes sobre la Tierra producen una ingente cantidad de partículas, entre las cuales se encuentran los piones. Estos se desintegran fundamentalmente en muones y neutrinos muónicos, y a su vez, los muones decaen en electrones y dos neutrinos: electrónico y muónico. Todos estos neutrinos generados por la radiación cósmica reciben el nombre de *neutrinos atmosféricos*. Estos, al contrario de los solares, inciden sobre la Tierra procedentes de todas las direcciones y sus energías son considerablemente (decenas o centenares de veces) más altas. Del análisis de los procesos de desintegración de los piones y muones, principal fuente de producción de neutrinos en la atmósfera, se concluyó que la relación entre el número de neutrinos muónicos y electrónicos debía ser de 2 a 1. Obsérvese que las partículas finales producidas en la desintegración de cada pion son un electrón, dos neutrinos (neutrino/antineutrino) muónicos y un neutrino (o antineutrino) electrónico.

El experimento Kamiokande estaba preparado para detectar estos neutrinos atmosféricos. Más aún, podía distinguir entre los dos tipos: muónico y electrónico. En ambos casos se producía un cono de luz de Cherenkov que daba lugar a un anillo luminoso que podía analizarse. Sin embargo, las señales eran muy distintas debido a la enorme diferencia de masa entre los dos leptones cargados asociados a ambos tipos de neutrinos: electrones y muones. Mientras que en el caso de los muones el anillo resultaba muy bien definido, para los electrones se observaba mucho más difuso. Así pues, el detector no solo podía determinar la energía y procedencia del neutrino, sino también el *sabor* del mismo. A mediados de 1980, coincidiendo con las medidas de neutrinos solares, tanto Kamiokande como el proyecto IMB (Irvine-Michigan-Brookhaven), localizado en una mina de Ohio (Estados Unidos), proporcionaron los primeros datos de neutrinos atmosféricos. Los resultados indicaban que el número de neutrinos muónicos era similar al de electrónicos. Una evidencia en clara contradicción con la predicción teórica. Se denominó

LA RADIACIÓN CHERENKOV

La radiación Cherenkov (o Cherenkov) recibe su nombre del físico ruso Pável A. Cherenkov (1904-1990), quien la descubrió en 1934 al observar que algunas sustancias radiactivas sumergidas en un medio, por ejemplo, agua, emitían una luz de tono azulado. El fundamento de la radiación Cherenkov es similar al que se produce cuando un objeto supera la velocidad del sonido en un medio. Se origina entonces una onda de choque cónica que se propaga a mayor velocidad que el sonido. Este fenómeno produce una explosión y se dice que se ha roto la *barrera* del sonido.

El frente de luz cónica

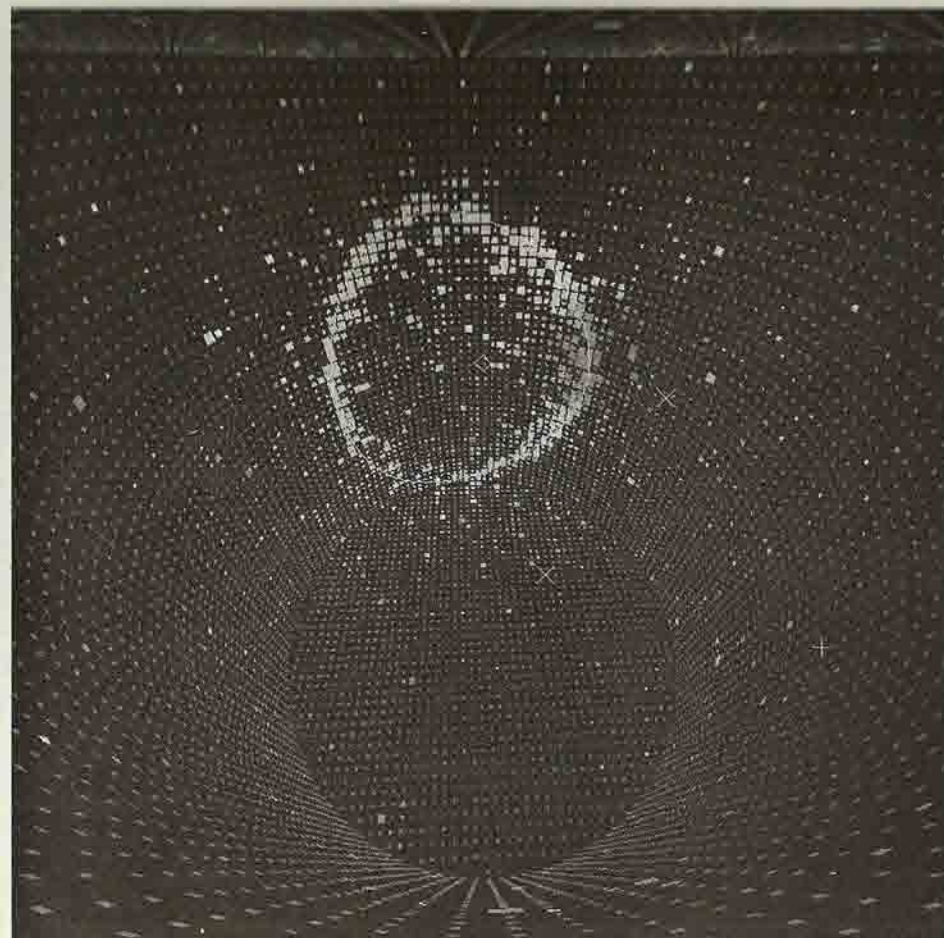
En el caso de la luz, el fenómeno tiene lugar cuando una partícula cargada se desplaza a través de un medio a una velocidad superior a la de la luz en dicho medio. Recuérdese que la velocidad de la luz en el vacío es un límite que no puede superarse. Sin embargo, la velocidad de la luz en otros medios materiales puede ser apreciablemente más baja, e inferior a la velocidad de propagación de determinadas partículas cargadas. En dicho caso, se produce un *frente de luz cónica* (radiación electromagnética) que puede detectarse. Midiendo el ángulo del cono de luz puede estimarse la velocidad de la partícula. Este es el fundamento del uso de la radiación Cherenkov en los detectores de neutrinos. Estos transfieren una gran energía a partículas cargadas que son emitidas con una velocidad superior a la de la luz. Ello da lugar al frente de onda de choque que se refleja en los famosos anillos de luz que permiten determinar la energía de los neutrinos incidentes.

Radiación Cherenkov brillando alrededor del núcleo, sumergido en agua, de un reactor nuclear instalado con fines educativos y de investigación científica en Portland, Oregón, Estados Unidos.



anomalía de los neutrinos atmosféricos y, aunque nadie podía saber en aquellos momentos si el problema se debía a un exceso de neutrinos electrónicos o a un déficit de neutrinos muónicos, lo cierto es que la situación era *demasiado* parecida al problema de los neutrinos solares. Cada vez resultaba más claro que el Sol y, por tanto, la teoría de Bahcall, no tenía nada que ver con el problema real. Todo parecía estar íntimamente ligado con el esquivo neutrino.

El desarrollo del nuevo detector, SuperKamiokande (SK), fue un intento de aclarar definitivamente el problema de los neutrinos atmosféricos. La técnica de SK era idéntica a la de su predecesor, pero tanto el contenido de agua en el tanque como el número de fotomultiplicadores se habían multiplicado por diez (véase la fotografía de las págs. 114-115). Las señales que se recogieron eran mucho más claras y se podía determinar con gran precisión tanto la procedencia como el tipo de neutrinos. Los primeros datos se hicieron públicos en 1998, produciendo un fuerte impacto en la comunidad de físicos. En el caso de los neutrinos producidos en la atmósfera justo por encima del laboratorio, es decir, los que incidían en el detector desde arriba, se comprobó que la relación entre los neutrinos muónicos y los electrónicos era de 2 a 1, tal y como se había predicho. Lo realmente interesante fue comprobar que este no era el caso para los datos correspondientes a los neutrinos que llegaban al detector desde abajo. Esta situación correspondía a neutrinos producidos en la atmósfera al otro extremo del planeta, y que alcanzaban finalmente el detector después de un viaje de unos 13000 km. El número de neutrinos muónicos que se detectaban era prácticamente el mismo que el de neutrinos electrónicos. Además, se comprobó que el problema no estaba asociado a los neutrinos electrónicos; para cualquier dirección de procedencia el número era muy parecido. La única explicación posible era que los neutrinos muónicos, en su largo viaje a través de la Tierra, desaparecían o se transformaban en otro tipo que no podía detectarse. Esta posibilidad abrió inmediatamente la puerta a la posible transformación de los neutrinos electrónicos generados en el Sol. Quizá el déficit de los neutrinos solares y la anomalía



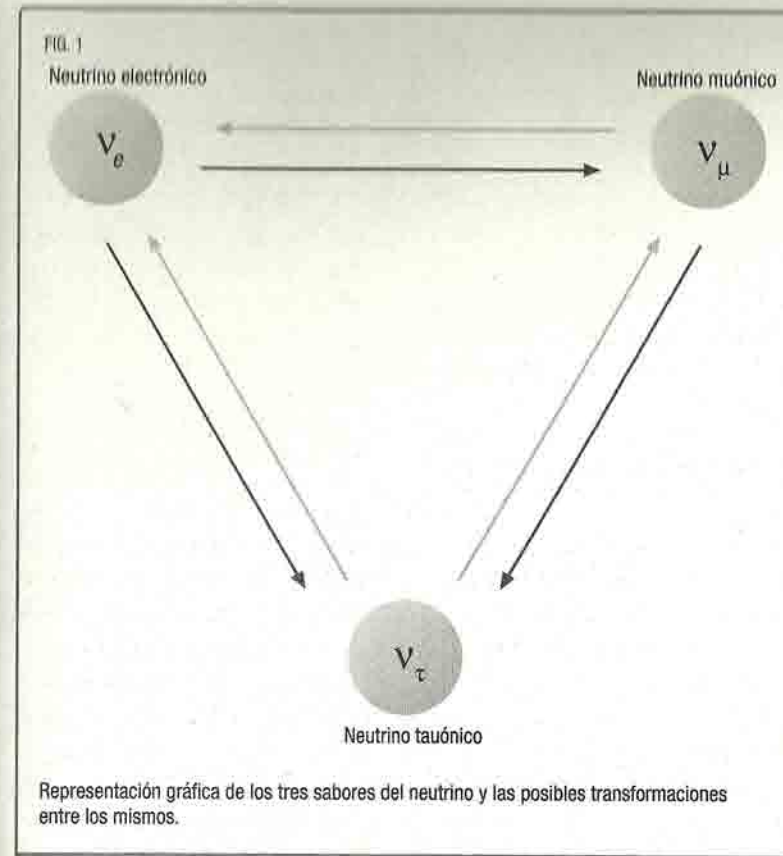
La detección de un neutrino suele mostrarse en gráficos digitales como este, que ofrecen la información de un modo más elocuente que mediante largas columnas de números. Después de verificar que lo detectado es realmente un neutrino y determinar de qué tipo es, el hallazgo contribuye de manera importante a validar teorías e incluso a hacer descubrimientos inesperados. En esta imagen se reproduce la estructura cilíndrica del SuperKamiokande, a partir de los pequeños puntos o cuadraditos. En líneas generales, cada uno de los puntos iluminados representa un fotomultiplicador que ha detectado luz, delatadora del aparente paso de un neutrino electrónico. Cuando el neutrino interactúa apropiadamente con un neutrón en el núcleo de una molécula de agua, dicha interacción produce un electrón y un protón. Ese electrón a menudo circula a una velocidad superior a la que alcanza la luz en el agua, y ello provoca la emisión de radiación Cherenkov. Esta, captada por algunos de los fotomultiplicadores, conforma un patrón típico, en forma de anillo, que se aprecia en el gráfico mediante los puntos brillantes. Detecciones como esta fueron la base de la comprobación definitiva de la transformación de un neutrino muónico en un neutrino electrónico, anunciada en 2013 por el equipo del experimento T2K.

de los neutrinos atmosféricos eran simplemente el reflejo de una única dificultad: el extraño y sorprendente comportamiento de los neutrinos. Al igual que los neutrinos muónicos atmosféricos desaparecían (o se transformaban) en pleno vuelo a través de la Tierra, lo mismo podía suceder con los neutrinos electrónicos generados en el Sol; en su largo trayecto hacia la Tierra muchos de ellos desaparecen y, por tanto, no pueden ser detectados. ¿Era esta la explicación? Pero, si desaparecían, ¿qué ocurría realmente con ellos? La respuesta la había proporcionado el físico italiano Bruno Pontecorvo muchos años antes, pero aún tenía que ser confirmada de modo irrefutable.

CAMBIOS DE PERSONALIDAD

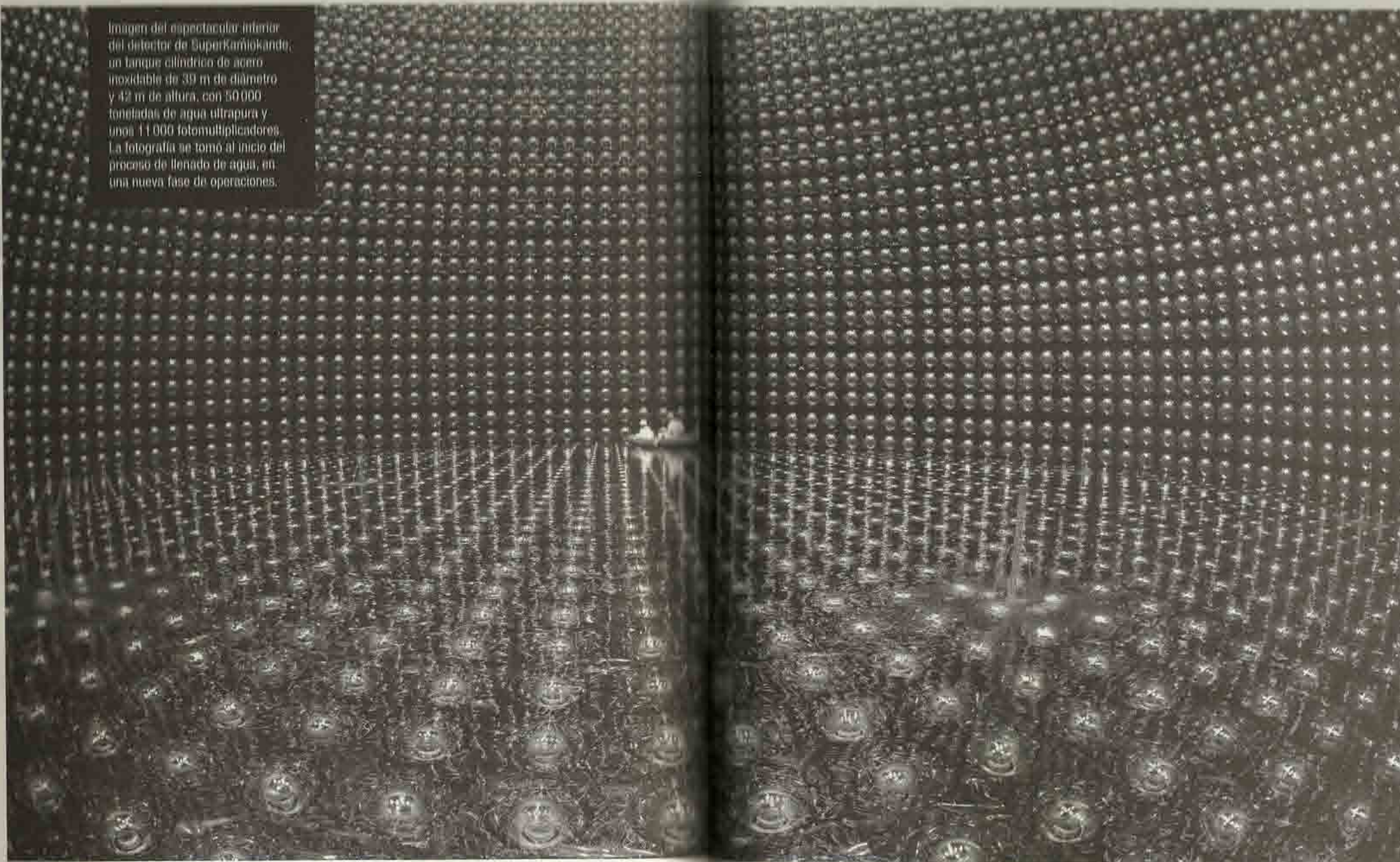
Poco tiempo después de la confirmación experimental de que los neutrinos se presentaban en distintos sabores, Pontecorvo exploró la posibilidad de que estas esquivas partículas pudiesen transformarse de un tipo en otro, es decir, pudiesen cambiar de sabor (figura 1). En aquellos momentos aún no había surgido el problema de los neutrinos solares, y la propuesta de Pontecorvo fue considerada como un simple ejercicio teórico sin ningún fundamento real. La situación cambió ligeramente tras las primeras medidas de Davis en 1968. Al año siguiente Pontecorvo y su colega Vladímir Gribov (1930-1997) publicaron un artículo en el que desarrollaron en detalle la teoría mostrando que los principios de la mecánica cuántica no solo permitían dichos procesos de transformación entre los distintos sabores, sino que este mecanismo podía proporcionar además una respuesta al reciente problema de los neutrinos solares descubiertos por Davis.

Recuérdese la propiedad de dualidad onda-corpúsculo. En el contexto de la teoría cuántica la descripción del comportamiento de las partículas subatómicas requiere considerar ambos caracteres. Toda partícula en movimiento lleva asociada una onda cuyas propiedades, longitud de onda y frecuencia, vienen determinadas por la masa y velocidad de la partícula considera-



da. Ambos caracteres están íntimamente relacionados, y no es posible describir de manera satisfactoria el comportamiento del mundo subatómico sin tomar en consideración esta dualidad de la materia. La propuesta original de Pontecorvo fue considerar que cada uno de los tipos de neutrinos (cada uno de los sabores) correspondía a diversos valores posibles de la masa. En otras palabras, los neutrinos que se creaban por interacción débil con un sabor específico no venían caracterizados por una masa determinada, sino que eran combinaciones de estados de masa diferente. Con una terminología algo más técnica, los estados propios de sabor no correspondían a estados propios de masa. Así pues,

Imagen del espectacular interior
del detector de SuperKamiokande;
un tanque cilíndrico de acero
inoxidable de 39 m de diámetro
y 42 m de altura, con 50 000
toneladas de agua ultrapura y
unos 11 000 fotomultiplicadores.
La fotografía se tomó al inicio del
proceso de llenado de agua, en
una nueva fase de operaciones.



Donde acaba el telescopio
comienza el microscopio.
¿Cuál de los dos tiene una visión
más grandiosa?

VICTOR HUGO

Pontecorvo simplemente hizo uso de algunas de las propiedades generales de la teoría cuántica y exploró qué posibles consecuencias podían derivarse de las mismas.

El hecho de que los neutrinos existiesen en diversos sabores y que cada

uno de ellos correspondiese a estados asociados a distintas masas era la idea esencial para explicar la posible transformación de unos estados en otros. Obsérvese que la propuesta de Pontecorvo requería que los neutrinos tuviesen masas no nulas, una propiedad que contradecía los principios establecidos en el modelo estándar. En este, los neutrinos eran partículas con masa nula y, por consiguiente, los estados de sabor eran inmutables. No existía ningún mecanismo que permitiese transformar un tipo de neutrino en otro. Una consecuencia de esta propiedad era que el número leptónico asociado a cada uno de los sabores se debía conservar estrictamente. En otras palabras, en el contexto del modelo estándar el neutrino no podía mostrar ningún trastorno de personalidad. Así pues, la propuesta de Pontecorvo significaba una profunda revisión de los propios cimientos del modelo estándar. De hecho, implicaba traspasar los propios límites del modelo, algo que muy pocos físicos estuvieron dispuestos a admitir en aquellos años.

De forma resumida, la propuesta de Pontecorvo implica que los neutrinos deben tener masa, pero que los estados definidos de sabor no se corresponden con estados definidos de masa. Esta diferenciación permite que, durante la propagación de los neutrinos, aparezcan estados de interferencia y se produzcan modificaciones en las probabilidades de detectar uno y otro tipo de sabor. En otras palabras, la probabilidad de detectar uno u otro tipo de neutrino va oscilando durante el trayecto. De aquí viene el nombre asignado a este fenómeno: *oscilaciones de neutrinos*. Es importante resaltar un aspecto que tuvo gran importancia cuando la teoría de Pontecorvo intentó aplicarse por primera vez al problema de los neutrinos solares. De hecho, fue una de las razones por las cuales muchos físicos no aceptaron

las ideas de Pontecorvo. Como ya se ha mencionado, un neutrino con un sabor dado viene descrito como una superposición de estados de masas diferentes. Sin embargo, la diferencia entre dichas masas tiene que ser tan pequeña que ningún experimento de producción o detección de neutrinos permita revelar ningún tipo de información sobre las mismas. Es decir, si la diferencia de masas entre los distintos estados fuese excesiva sería difícil incluso hablar de neutrinos electrónicos, muónicos o tauónicos cuando se producen o detectan.

Los primeros resultados de Davis sobre neutrinos solares mostraron que solo se detectaba aproximadamente una tercera parte de los neutrinos electrónicos producidos en el centro del Sol. Muchos físicos consideraban esta «desaparición» de neutrinos excesiva para poder ser justificada con las ideas de Pontecorvo. Ello implicaba oscilaciones enormes hacia otros sabores, y esto solo se podía entender si los estados propios de masa correspondían a valores muy distintos, una propiedad difícilmente compatible con la imagen de la producción y detección de los distintos tipos (sabores) de neutrinos. La situación sufrió un importante cambio tras el trabajo de los físicos teóricos Lincoln Wolfenstein (1923-2015), Stanislav Mikheyev (1940-2011) y Alexéi Smirnov (1951) en el que mostraron que la probabilidad de oscilación podía cambiar de modo notable debido al medio en el que se propagaban los neutrinos. Así, las oscilaciones en el vacío podían ser muy distintas a las producidas en el interior del Sol. En el caso de los neutrinos solares, desde que el neutrino electrónico se generaba en el centro del Sol hasta que alcanzaba la superficie del mismo, la presencia de la materia solar podía amplificar de modo apreciable la probabilidad de que los neutrinos oscilasen. Una mínima diferencia entre las masas correspondientes a los estados del neutrino electrónico inicial podía dar lugar a profundos cambios de sabor debido a la presencia del medio. Este fenómeno se denominó *efecto MSW* (Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein). Los resultados sobre neutrinos atmosféricos no hicieron más que confirmar el fenómeno de oscilaciones de neutrinos. No solo pudo comprobarse que dichas oscilaciones dependían de la distancia recorrida por los neutrinos, sino también de la energía

LAS OSCILACIONES DE LOS NEUTRINOS

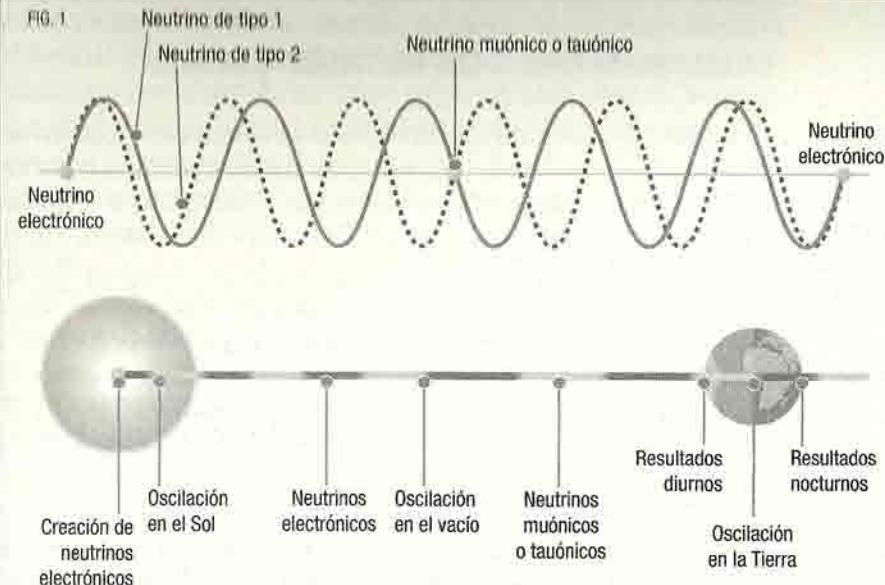
Presentaremos en algo más de detalle el mecanismo propuesto por Pontecorvo. Para ello, se restringirá la discusión al caso de dos sabores, electrónico y muónico, que son los tipos de neutrinos que se conocían cuando Pontecorvo presentó su trabajo. La incorporación del tercer sabor, tauónico, no modifica apreciablemente los argumentos que siguen.

Superposición de estados

Consideremos que, como consecuencia de un determinado proceso debido a la interacción débil, se crea un neutrino con un sabor determinado, por ejemplo, el caso de la producción de neutrinos electrónicos en el centro del Sol. Siguiendo la teoría de Pontecorvo, este neutrino electrónico no corresponde a un estado propio de masa. Esto significa que el estado que describe dicho neutrino electrónico corresponde a varios estados de masa, y por consiguiente, debe venir descrito como una superposición (combinación lineal) de dichos estados, cada uno de los cuales corresponde a un valor específico de la masa. Supongamos el caso más simple en el que el número de estados de masa coincide con el número de sabores, es decir, dos. Podemos expresar simplemente: $v_e = \cos\theta v_1 + \sin\theta v_2$, donde v_1 y v_2 representan los estados de masa definida. Una expresión similar se obtendría para los neutrinos muónicos. El término describe al nombre de *ángulo de mezcla*.

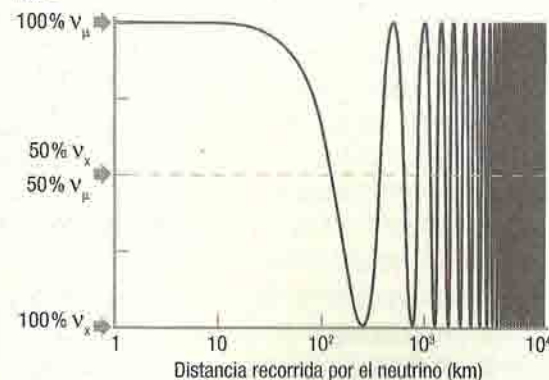
Probabilidades

Haciendo uso de las propiedades de la teoría cuántica, la propagación del neutrino electrónico desde el lugar donde se originó (centro del Sol) hasta la Tierra implica la propagación de las ondas cuánticas asociadas a sus dos estados propios de masa. Si ambos valores son ligeramente distintos, las dos ondas vendrán caracterizadas por frecuencias o longitudes de ondas diferentes, produciéndose un fenómeno de interferencia entre las mismas. De este modo, situaciones de *interferencia constructiva y destructiva* irán alternándose, y solo en aquellos instantes en que las dos ondas se encuentren en un estado idéntico al inicial podremos hablar del neutrino con el estado de sabor electrónico definido. En cualquier otro momento, la combinación de estados de masa será distinta a la inicial, y ello significa que no podría hablarse de un neutrino de sabor determinado, sino de una mezcla de los posibles estados: electrónico y muónico (figura 1). Puede demostrarse que el valor del ángulo de mezcla determina la amplitud de las oscilaciones (proporción del sabor muónico respecto al electrónico inicial), mientras que la mayor o menor frecuencia de las oscilaciones está ligada a la distancia recorrida y a la diferencia de masas al cuadrado correspondientes a los dos estados: v_1 y v_2 . A mayor diferencia de masas o menor energía de los neutrinos, la frecuencia de cambio de sabor aumenta. En la figura 2 se representa la probabilidad de oscilación de los neutrinos en función de la distancia recorrida por los mismos (en escala logarítmica). Obsérvese que para distancias pequeñas, 10-20 km, la probabilidad de que el neutrino mantenga su sabor original es prácticamente del 100%, es decir, no se produce ningún cambio. Por el contrario, cuando ha recorrido 10.000 km (extremo derecho de la figura) se han producido numerosos cambios de sabor (véanse las oscilaciones), de modo que existe básicamente la mínima probabilidad (50%) de encontrar al neutrino con su sabor original o con cualquier otro.



La ilustración muestra el fenómeno de las oscilaciones de neutrinos. Los distintos estados de masa se propagan con frecuencias ligeramente distintas, dando lugar a fenómenos de interferencia constructiva y destructiva.

FIG. 2



Al inicio de su trayecto de 10.000 km, hay un 100% de posibilidades de que el neutrino conserve su sabor original, en este caso el muónico. Después, las probabilidades se decantan hacia otro sabor (indicado con la «x») y hacia el original alternativamente, de tal modo que tras viajar 10.000 km y cambiar de sabor infinitas veces, hay un 50% de probabilidades de que presente su sabor original y otro 50% de que tenga otro.

de los mismos. Las evidencias experimentales estaban perfectamente de acuerdo con las predicciones de la teoría.

LA RESPUESTA FINAL A LOS NEUTRINOS AUSENTES

El fenómeno de las oscilaciones junto al efecto MSW podían ser la respuesta al déficit de los neutrinos solares, problema que llevaba planteado más de treinta años. Sin embargo, se necesitaba una prueba definitiva, un experimento que mostrase de modo inequívoco que, efectivamente, los neutrinos oscilaban modificando su sabor. Este fue el objetivo del experimento SNO (*Sudbury Neutrino Oscillation*) que se llevó a cabo en Ontario (Canadá) entre 1999 y 2003. La técnica era idéntica a la usada en Kamiokande, es decir, la detección de los neutrinos a través del efecto Cherenkov. El detector consistía en un recipiente esférico de doce metros de diámetro que contenía mil toneladas de agua pesada con una pureza isotópica superior al 99,9%. Este recipiente estaba a su vez rodeado por una segunda esfera con unos diez mil fotomultiplicadores repartidos por toda su superficie. Finalmente, todo el sistema estaba contenido en una cavidad llena de agua ultrapura a unos dos mil metros de profundidad.

Los primeros datos se anunciaron en julio de 2001. Estos resultados se compararon con los obtenidos por el experimento SuperKamiokande en condiciones similares. Aunque el objetivo fundamental del experimento japonés estuvo centrado en los neutrinos atmosféricos, también pudieron obtenerse datos sobre neutrinos solares. El flujo de neutrinos electrónicos correspondiente a SNO era algo menor que el que se había obtenido en SuperKamiokande. Esto no resultó extraño puesto que el detector japonés también era sensible a los otros tipos de neutrinos, muónico y tauónico. Del análisis combinado de ambos experimentos pudo estimarse el flujo total de neutrinos incluyendo los tres sabores. Los datos del análisis indicaron claramente que el número de neutrinos electrónicos era un tercio del total. Los resultados originales de Davis y los cálculos de Bahcall recibían un espaldarazo definitivo. De hecho, los primeros datos de SNO se

anunciaron como la «solución a un misterio de treinta años de antigüedad: el enigma de los neutrinos desaparecidos». Sin embargo, la supuesta solución al problema de los neutrinos solares estaba basada en la combinación de datos de dos experimentos diversos. ¿No sería posible obtener una clara respuesta al problema haciendo uso de un único experimento? ¿Podría determinar SNO el número total de neutrinos especificando claramente cuántos correspondían a cada sabor? El uso del agua pesada fue la clave que permitió encontrar las respuestas y, consiguientemente, aclarar de manera definitiva el problema de los neutrinos solares.

El agua pesada está constituida por deuterio en lugar de hidrógeno. El núcleo de deuterio está conformado por un protón y un neutrón. Los neutrinos solares incidentes podían interactuar directamente con los electrones del medio dando lugar a la radiación Cherenkov. Este proceso, similar al que se analizó en SuperKamiokande, podía tener lugar con cualquier tipo de neutrino aunque era bastante más probable en el caso de los neutrinos electrónicos. El aspecto realmente novedoso del experimento SNO, y lo que permitió por fin resolver el problema de los neutrinos solares, tuvo lugar al analizar directamente la interacción de los mismos con los núcleos de deuterio. Puesto que la energía de los neutrinos era suficientemente alta, los núcleos podían romperse liberando sus constituyentes básicos. Del análisis de estos pudo concluirse el tipo de neutrino que había intervenido en el proceso. Para entender este resultado, considérese el caso de neutrinos electrónicos. Estos, tras interactuar con los núcleos de deuterio, podían adquirir carga transformándose en electrones con la consiguiente modificación de neutrones en protones. Así pues, como consecuencia del choque, los productos para cada reacción serían dos protones y un electrón. Este proceso no podía tener lugar para los otros dos tipos de neutrinos, muónico y tauónico; sin embargo, estos sí podían chocar elásticamente con los núcleos produciendo su ruptura. En esta situación, los productos finales serían un protón, un neutrón y el neutrino. En este proceso de *choque elástico* los tres tipos de neutrinos podían contribuir. Esquemáticamente, las dos reacciones conside-

radas son las siguientes: 1) $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ y 2) $\nu_i + d \rightarrow p + n + \nu_i$, donde ν_i es cualquier sabor del neutrino. La determinación de ambos procesos permitió a los miembros de la colaboración SNO estimar no solo el flujo total (incluyendo los tres tipos) de neutrinos solares sino también la proporción correspondiente exclusivamente a los neutrinos electrónicos. En septiembre de 2003 se anunciaron los datos definitivos. Estos confirmaron los resultados preliminares y mostraron, sin lugar a dudas, que la cantidad de neutrinos electrónicos era aproximadamente una tercera parte del flujo total. El experimento SNO pudo concluir, con una fiabilidad superior al 99,99%, que los neutrinos del Sol cambian (oscilan) de un tipo a otro durante su trayecto desde el centro del Sol hasta la Tierra.

Tras más de treinta años de dudas e incertidumbres, Davis y Bahcall fueron finalmente *rehabilitados*. Este último no pudo evitar afirmar que durante muchos años se había sentido como una persona a la que por error se hubiese acusado de un delito, hasta que la prueba definitiva de ADN lo exoneró. Es interesante mencionar que los cálculos de Bahcall sobre producción de neutrinos en el Sol estaban en perfecto acuerdo con las evidencias experimentales de SNO; de hecho, en palabras del propio Bahcall, el acuerdo resultaba «embarazosamente bueno».

El mensajero del universo

Aunque el experimento SNO confirmó de modo inequívoco la «realidad» de las oscilaciones de los neutrinos, aún nos preguntamos si neutrinos y antineutrinos son la misma partícula. Por otra parte, la detección de neutrinos extragalácticos ha abierto una nueva ventana al universo.

¿Nos proporcionarán estas esquivas partículas la información más fiable sobre el mundo en el que vivimos?

La cambiante personalidad del neutrino quedó firmemente confirmada a comienzos del siglo *xxi*. Se demostró que la ingeniosa idea propuesta por Pontecorvo muchos años antes sobre el fenómeno de oscilación era correcta, y que el modelo solar desarrollado por Bahcall describía con gran precisión el funcionamiento del Sol. Ambos físicos estuvieron en lo cierto desde el principio, y sin embargo, ninguno de los dos fue galardonado con el premio Nobel. Una muestra de que la máxima recompensa, aunque llegue a muchos, no siempre llega a todos. Las oscilaciones de neutrinos han acaparado el interés de muchos grupos de investigación, convirtiéndose en uno de los proyectos «estrella» de la física del siglo *xxi*. El máximo interés reside en estimar las masas de los neutrinos y comprender la razón de ser de las transformaciones entre los tres distintos sabores.

El neutrino es la partícula más esquiva del universo. Puede proceder de los lugares más lejanos sin haber sufrido prácticamente ninguna interacción. Es el auténtico mensajero portador de la información más precisa sobre la propia estructura y evolución del mundo en el que vivimos. Nadie pudo prever que unas cuantas señales tomadas de forma inesperada por los detecto-

res IMB en Estados Unidos y Kamiokande en Japón terminarían convirtiéndose en la confirmación más clara de lo que hasta entonces solo había sido la teoría que explicaba la explosión y colapso de una gran estrella. Por primera vez se dispuso de evidencias experimentales que confirmaron las predicciones teóricas. Fue el principio de un nuevo campo: la astronomía de neutrinos. Desde entonces disponemos de unos nuevos telescopios con los que podemos mirar más allá de todo lo conocido. ¿Podremos llegar con ellos a los confines del universo?

EXPERIMENTOS SOBRE OSCILACIONES

El estudio de los neutrinos solares y atmosféricos permitió finalmente confirmar la «realidad» de las oscilaciones. La comunidad de físicos aceptó que los neutrinos modificaban su sabor, es decir, cambiaban de un tipo a otro durante el trayecto que recorrían. Sin embargo, ¿cómo tenían lugar dichos cambios? ¿Cuál era la frecuencia de los mismos? ¿Podría preverse qué tipo específico de neutrino surgiría tras la oscilación? ¿Podría ayudarnos el fenómeno de las oscilaciones a conocer mejor las masas de los neutrinos? El cambio en la personalidad del neutrino era incuestionable pero aún existían demasiados interrogantes. Era imprescindible realizar nuevos experimentos que permitiesen adquirir datos más precisos. El interés fundamental era estimar los denominados *ángulos de mezcla*, responsables directos de la amplitud de las oscilaciones, y las propias masas de los neutrinos. El objetivo estaba muy claro, pero ¿cómo llevarlo a cabo? Desde el primer momento, se tuvo la convicción de que la única forma era haciendo uso de detectores más y más precisos y, sobre todo, disponiendo de una fuente generadora de neutrinos que pudiese manipularse libremente y sobre la cual se dispusiese de información precisa.

Las oscilaciones habían permitido explicar los datos de los neutrinos solares y atmosféricos. En ambos casos se trataba de flujos enormes de neutrinos sobre los que no se tenía ningún control. De hecho, las propias medidas experimentales debían

compararse con las predicciones teóricas que estimaban el ritmo de producción de los neutrinos en el Sol o en la atmósfera tras la colisión de los rayos cósmicos. Un modo de solventar estas incertidumbres era haciendo uso de los neutrinos producidos directamente en reactores nucleares o aceleradores. Recuerdese que este no era un procedimiento nuevo. Los primeros experimentos, incluso aquel que permitió el propio descubrimiento del neutrino, estuvieron basados en el uso de reactores nucleares. Sin embargo, en todos los casos los detectores se situaron muy próximos al reactor con el fin de que llegasen la mayoría de neutrinos producidos y, con suerte, algunos de ellos dejaran una señal. En aquellos primeros momentos aún no había surgido el problema de los neutrinos solares, y la multifacética y cambiante personalidad del neutrino era algo impensable. Ahora, por el contrario, la situación había cambiado radicalmente, y la detección de neutrinos producidos en aceleradores o reactores era el camino para determinar con más y más precisión la propia naturaleza de estas esquivas partículas. El procedimiento consistía en disponer de dos detectores. Uno de ellos se situaba muy próximo al acelerador o reactor y el otro a una distancia de centenares de kilómetros. La comparación entre las medidas obtenidas por ambos detectores permitiría estimar el ritmo de las oscilaciones, el tipo concreto de modificación que tenía lugar y, posiblemente, los valores de las masas de los neutrinos.

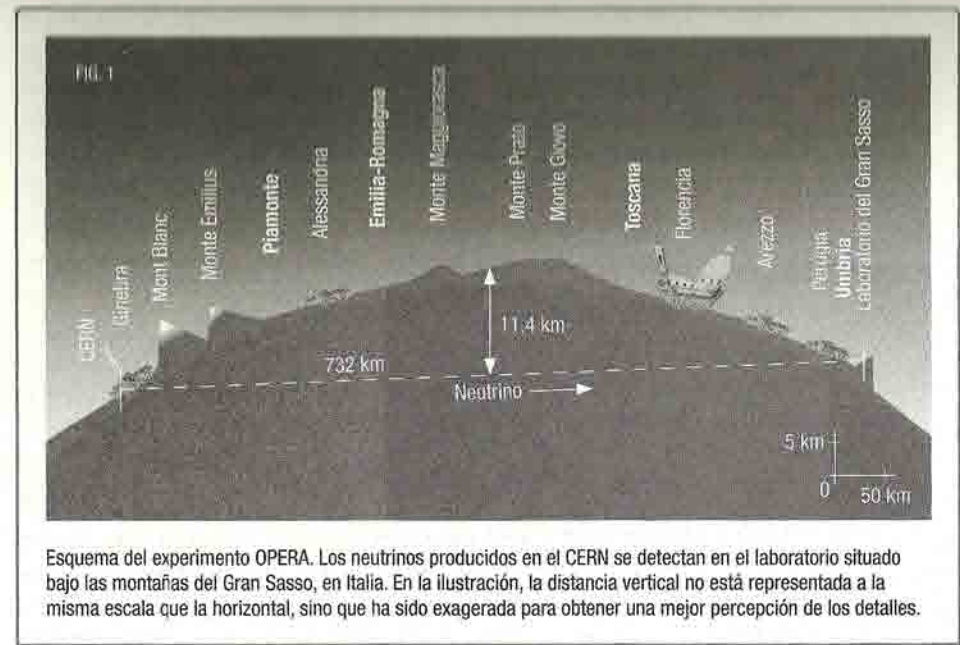
Son numerosos los experimentos que se han realizado en los últimos años, sin que sea necesario dar una lista exhaustiva de los mismos. Algunos de ellos aún siguen en funcionamiento proporcionando datos cada vez más precisos. En algunos de los casos se trata de experimentos asociados a aceleradores construidos específicamente para la producción de neutrinos; en otros, las medidas corresponden a la detección de neutrinos o antineutrinos generados en los reactores de las centrales nucleares.

El primer experimento que confirmó el fenómeno de las oscilaciones en neutrinos producidos por un acelerador fue K2K (KEK to Kamioka). Este experimento estuvo operativo entre los años 1999 y 2004 e hizo uso del detector de SuperKamiokande. Los neutrinos se producían en un acelerador situado en la

ciudad japonesa de Tsukuba y recorrían unos 250 km hasta el detector. Las señales de K2K confirmaron los datos previos sobre neutrinos atmosféricos. En el año 2009 comenzó a operar T2K (Tokai to Kamioka) (sucesor de K2K). Se trata de un experimento de alta precisión cuyo objetivo es determinar el espectro de energía de los neutrinos y la frecuencia y amplitud de oscilaciones de neutrinos muónicos a electrónicos. Este experimento, aún operativo, ha proporcionado información sobre uno de los ángulos de mezcla que aparecen en la teoría de las oscilaciones.

En Estados Unidos se desarrolló en 2005 el proyecto MINOS (Main Injector Neutrino Oscillation Search). El detector, situado en una mina de Minnesota, recibía los neutrinos producidos en el laboratorio Fermilab de Chicago, a una distancia de 735 km. El objetivo básico del experimento es medir las oscilaciones asociadas a los neutrinos y antineutrinos muónicos. Otros experimentos de interés relacionados directamente con las instalaciones de Fermilab son ArgoNeUT, MinervA, NOvA, SciBooNE y MiniBooNE. En este último caso el objetivo es comprobar los resultados de un experimento previo, LSND (Liquid Scintillator Neutrino Detector) (Los Álamos, Estados Unidos), que indicaban oscilaciones considerablemente mayores que las observadas en el caso de neutrinos solares y atmosféricos. Los datos del experimento, aún en funcionamiento, no son todavía concluyentes.

En Europa también se han realizado diversos experimentos haciendo uso de los neutrinos generados por algunos de los aceleradores del CERN (Centro Europeo de Investigaciones Nucleares). Este es el caso de los proyectos ICARUS (Imaging Cosmic And Rare Underground Signals) y OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus) en los que los neutrinos producidos en el CERN recorren una distancia de unos 730 km hasta llegar a los detectores situados en el laboratorio del Gran Sasso en Italia (figura 1). El objetivo básico de los experimentos es determinar la reducción, debido a las oscilaciones, en el número de los neutrinos muónicos. En el caso del experimento OPERA, el detector puede determinar, en principio, cuántos neutrinos tauónicos se producen debido a las oscilaciones.



No fue este, sin embargo, el hecho por el que el experimento OPERA se hizo famoso en 2011, apareciendo como primera noticia en la mayoría de medios de comunicación. Las oscilaciones nunca hubiesen podido justificar el impacto que se produjo. Los investigadores de la colaboración OPERA comunicaron que habían detectado neutrinos viajando a una velocidad superior a la de la luz en el vacío. Los neutrinos llegaban a los detectores de Italia en un tiempo menor que el que hubiese necesitado la luz desplazándose en el vacío. La noticia cogió de improviso a todos los físicos y, durante algún tiempo, la información en los medios fue de lo más variopinta. Desde ministros que se mostraron orgullosos de la contribución de sus países en la construcción del enorme túnel de casi 750 km a través del cual se habían desplazado los famosos neutrinos, hasta «sesudos» periodistas que se extrañaron por el revuelo causado; a fin de cuentas, todo el mundo sabía que los neutrinos eran unas extrañas partículas que viajaban más rápido que la luz. Entre la reducida comunidad de

físicos el impacto de la noticia no fue menor. Los datos de los investigadores de OPERA iban en contra de infinidad de evidencias experimentales, y desmontaban uno de los pilares de la física moderna: la teoría de la relatividad. Esta había explicado con una precisión inimaginable una infinidad de procesos en el mundo subatómico. Por consiguiente, la mayoría de los físicos adoptaron una postura de enorme cautela y precaución. No obstante, también aparecieron artículos científicos con las explicaciones más variopintas del «fenómeno» observado. En 2012 los propios investigadores de OPERA reconocieron que habían cometido un error en las medidas. Todo volvió a la normalidad en poco tiempo. Ciertamente, los neutrinos mostraban las propiedades más extrañas, pero que viajaran más rápido que la luz en el vacío no parecía ser una de ellas.

Para concluir, un breve comentario sobre los experimentos de oscilaciones realizados con neutrinos generados por reactores nucleares. Destaca el experimento KamLAND (Kamioka Liquid Scintillator Antineutrino Detector) en Japón que comenzó a ser operativo en 2002. El mismo hacía uso de las instalaciones de SuperKamiokande donde se detectaban los neutrinos producidos en los 55 reactores nucleares que operaban en Japón en aquellos años. Por razones obvias, este experimento sufrió un drástico parón tras el desastre nuclear de Fukushima del 11 de marzo de 2011.

NEUTRINOS EXTRAGALÁCTICOS

El 23 de febrero de 1987 los telescopios ópticos del hemisferio austral observaron un fogonazo luminoso en la Gran Nube de Magallanes (LMC), una galaxia vecina a la nuestra. El brillante destello de luz era la manifestación de una *supernova*, es decir, la explosión de una gran estrella mucho más masiva que el Sol, como se muestra en las imágenes de la página contigua. Realmente, la explosión (llamada SN 1987A) había tenido lugar unos 170 000 años antes, en plena edad de Piedra. Este es el tiempo que la luz había necesitado para recorrer el inmen-



Arriba, fotografía de la Gran Nube de Magallanes antes de la explosión de la supernova (panel izquierdo) y después (panel derecho). Abajo, el remanente de la supernova; la imagen ha sido tomada empleando luz en diferentes longitudes de onda.

so espacio interestelar hasta alcanzar la Tierra. Lo verdaderamente asombroso del fenómeno es que algunas horas antes de ver el fogonazo de luz, billones de neutrinos procedentes de la moribunda estrella habían atravesado la Tierra sin que nadie se percatase de ello. Es lo que se pensó en un principio, pero no fue así. Algunos de los neutrinos procedentes de la supernova dejaron señal de su presencia en varios detectores. Esto es lo que sucedió en el caso de Kamiokande en Japón e IMB en Estados Unidos. El primero detectó once sucesos correspondientes a neutrinos con energías comprendidas entre 10 y 20 MeV; IMB registró ocho eventos con energías entre 20 y 50 MeV. Estos valores son considerablemente mayores que las energías asociadas a los neutrinos solares. Es posible que el lector se muestre bastante escéptico con los resultados obtenidos; 19 señales no parecen muchas como para sentirse orgullosos. Sin embargo, lo verdaderamente asombroso es que dichas señales llegasen a ser registradas distinguiéndolas claramente de todas las demás medidas asociadas a los neutrinos solares y atmosféricos. Fue una prueba inequívoca de la «tremenda» violencia generada en la explosión de la estrella.

Antes de 1987 los físicos habían desarrollado ya teorías que explicaban el colapso gravitatorio de una supernova. El destello luminoso podía superar incluso durante un breve instante el brillo de una galaxia entera. Asimismo, existía el convencimiento de que la radiación electromagnética (luz visible, ondas de radio, rayos X, rayos gamma, etc.) solo representaba una mínima proporción de la energía total producida por la supernova, menos del 1%. La mayor parte de la energía se emitía en forma de neutrinos. Las medidas de 1987 constituyeron una clara confirmación de las predicciones teóricas. No resulta fácil imaginar el carácter extraordinario de la explosión de una supernova. El *incommensurable* número de neutrinos producidos en el colapso comenzó a propagarse por todo el espacio interestelar configurando una esfera de 170 000 años-luz de radio cuando alcanzaron la Tierra; una esfera lo bastante grande como para contener por completo en su interior a la galaxia. La estimación del flujo de neutrinos que llegaron a la Tierra no era muy distin-

ta a la de neutrinos solares. Además, la energía de cada uno de los neutrinos de la supernova era entre 10 y 100 veces mayor que el valor promedio de la energía de los neutrinos solares. En 1987, durante unos breves instantes, miles de billones de neutrinos producidos en la supernova atravesaron la Tierra. De ellos, muchos miles de millones pasaron a través de IMB y Kamiokande, y solo unos pocos dejaron señal de su paso. Fue suficiente. Pudo determinarse su procedencia, su energía y el instante en el que interaccionaron con el medio del detector. Apenas un par de decenas de medidas fueron más que suficientes para «observar» por primera vez lo que realmente sucedía en la explosión de una supernova.

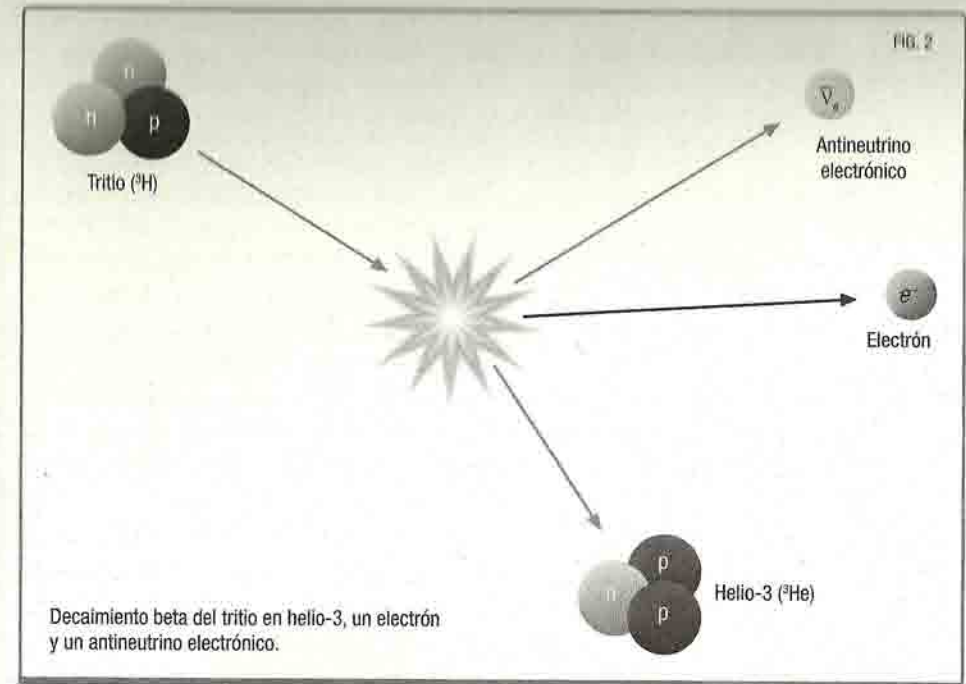
La elevada energía de los neutrinos indicó que la temperatura en el interior de la estrella justo antes de producirse su colapso era significativamente mayor que en el Sol. Se estimó en unos cuarenta mil millones de grados, un valor que confirmaba las predicciones teóricas realizadas por los astrofísicos. Otro aspecto esencial de las señales detectadas es que estas se produjeron en un intervalo de unos 10 segundos aproximadamente. Este resultado indicaba que los neutrinos necesitaron varios segundos para escapar al exterior, lo que significaba que la supernova había dado lugar a la formación de un objeto con una densidad similar a la de los propios núcleos atómicos. Esta imagen coincidía con la formación de una estrella de neutrones, un mecanismo que ya había sido propuesto por los astrofísicos años antes. Así pues, los 19 neutrinos detectados por IMB y Kamiokande confirmaron lo que hasta entonces había sido solo una teoría. Las estrellas muy masivas consumen su hidrógeno a un ritmo bastante elevado produciendo elementos más pesados. En su última fase, la estrella presenta un núcleo estelar constituido por hierro y varias capas concéntricas con elementos más ligeros. En un determinado momento el peso de la estrella supera a la repulsión entre los electrones. En esta situación los electrones se combinan con los protones de los núcleos atómicos dando lugar a neutrones y neutrinos electrónicos. Surge así la estrella de neutrones que impide su propio derrumbe, pero produce una onda de choque violentísima dando lugar a

la explosión que conocemos como *supernova*. La temperatura en la estrella de neutrones es superior a cien mil millones de grados, lo que produce la formación de pares neutrino-antineutrino de todos los sabores. Este es el mecanismo principal de producción de neutrinos en una supernova, un mecanismo que actúa durante varios segundos produciendo una *infinitud* de neutrinos.

Los neutrinos de la supernova de la Nube de Magallanes de 1987 dejaron sus señales en los detectores varias horas antes de que los telescopios ópticos pudiesen observar los destellos de la explosión. Esto no significa que los neutrinos hayan viajado más velozmente que la luz —la teoría de la relatividad sigue siendo un pilar básico de la física— sino que pudieron escapar antes de la supernova. Recuérdese el tiempo que transcurría desde que los fotones eran generados en el centro del Sol hasta que alcanzaban su superficie. Algo similar sucede en el caso de las supernovas; los fotones sufren continuas interacciones en su viaje a través de las diversas capas de la supernova, mientras que los neutrinos encuentran muchos menos obstáculos. Los neutrinos se convierten de este modo en auténticos mensajeros del universo. Pueden indicarnos la explosión de la supernova con la suficiente antelación como para que los astrónomos dirijan sus telescopios ópticos hacia el lugar del firmamento señalado.

MASAS DE LOS NEUTRINOS

Las oscilaciones de neutrinos requieren que estos tengan masa; sin embargo, ¿cómo determinar sus valores? A pesar de lo mucho que hemos ido aprendiendo en los últimos años sobre la propia naturaleza del neutrino, este sigue mostrándose reticente y elusivo. Cada vez que creemos haber entendido un aspecto de su personalidad, surgen nuevas e inesperadas facetas que nos obligan a replantear el problema desde una óptica distinta. La determinación de las masas de los neutrinos no es una tarea fácil. Requiere experimentos más y más precisos que permitan ir acotando los valores permitidos. También será necesi-



rio encontrar una explicación del porqué de dichos valores. En el marco del modelo estándar los neutrinos son partículas sin masa. Esto explica que los estados de polarización para neutrinos y antineutrinos estén perfectamente determinados, y que no sea posible el cambio de sabor. La incorporación de neutrinos masivos significa la modificación del modelo estándar. *A priori*, esta no es una dificultad insalvable, pero implica la introducción de unos nuevos estados, denominados neutrinos *dextrógiros*, que resultan muy difíciles de observar experimentalmente puesto que ni siquiera sienten la interacción débil. La física de neutrinos nos muestra todo su potencial con campos aún sin explorar, pero no nos proporciona ninguna guía teórica que nos permita «conocer» las masas de los neutrinos. Solo existe una opción: los experimentos.

En el caso de los neutrinos electrónicos, uno de los métodos más apropiados para determinar su masa es el proceso de desin-

DOS IMÁGENES DEL NEUTRINO: DIRAC VERSUS MAJORANA

Recordemos que neutrinos y antineutrinos se presentan en estados definidos de polarización. Solo los neutrinos levógiros y antineutrinos dextrógiros sienten la interacción débil. Esta separación estricta entre estados de polarización solo es posible para neutrinos sin masa. Por el contrario, si los neutrinos (y antineutrinos) son masivos, estos vendrían dados como una superposición de ambos estados de polarización. Nótese que un neutrino *zurdo* sería visto como *destro* por un observador en un sistema de referencia desplazándose a una velocidad superior a la del neutrino. Así pues, la masa de los neutrinos plantea dos cuestiones: 1) ¿qué relación existe entre la masa y el estado de polarización?, y 2) ¿por qué las masas de los neutrinos son tan extraordinariamente pequeñas?

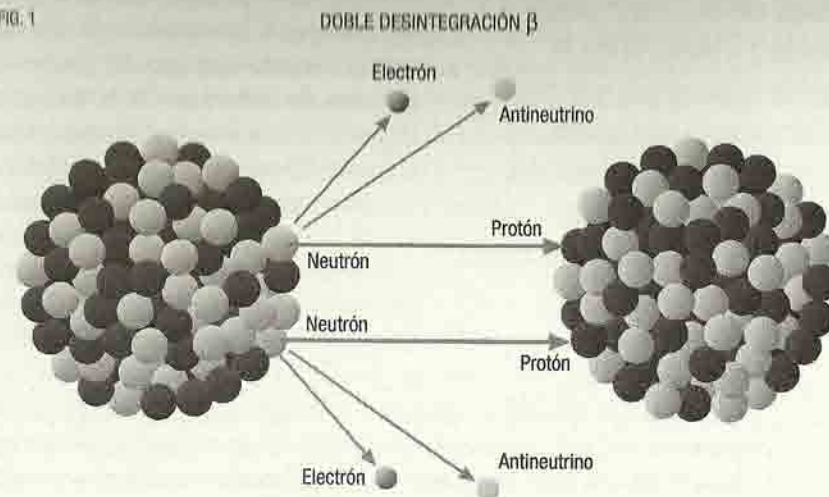
Dos interpretaciones

Existen dos imágenes del neutrino. En una de ellas, el neutrino es una partícula de Dirac. Esto significa que la descripción del mismo es similar al caso de los electrones y demás leptones, existiendo una clara diferenciación entre neutrinos y antineutrinos. Esta interpretación implica que deben existir neutrinos *dextrógiros* y antineutrinos *levógiros* que no sienten la interacción débil, y por consiguiente, prácticamente imposibles de detectar. La segunda imagen consiste en considerar al neutrino como una *partícula de Majorana*. En esta interpretación neutrinos y antineutrinos son la misma partícula y, consiguientemente, desaparece el problema entre la interacción débil y los posibles estados definidos de polarización.

La desintegración doble beta

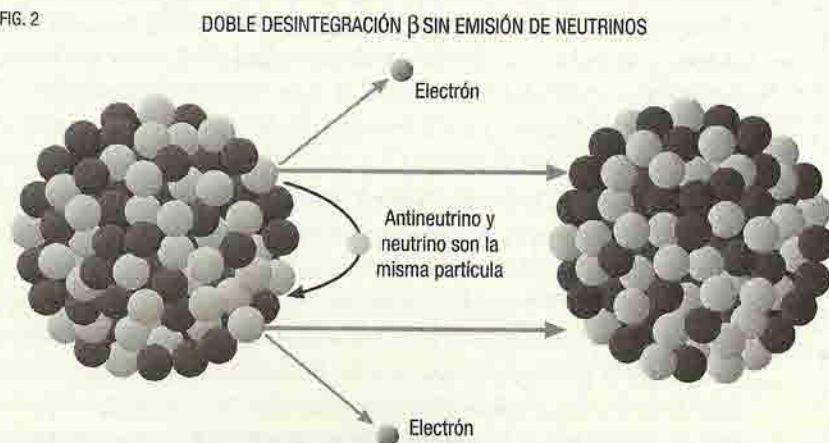
¿Es posible determinar si los neutrinos son partículas de Dirac o de Majorana? La respuesta puede venir dada a través del denominado *proceso doble beta*. Algunos núcleos atómicos, que no pueden decaer por una desintegración beta normal, sí pueden transformarse en sistemas más estables a través del proceso doble beta. Dos neutrones se transforman en protones con la emisión de dos electrones y dos antineutrinos. Este proceso está representado en la figura 1. En 1939, años antes de que se descubriese el neutrino, el físico estadounidense Wendell H. Furry (1907-1984), conocido por sus colaboraciones con J. Robert Oppenheimer, Vladimir Fock y otros, y posterior objeto de la persecución anticomunista, propuso que la desintegración doble beta podía tener lugar sin la emisión de neutrinos. Para ello, el antineutrino producido en una de las desintegraciones tendría que ser absorbido por un nuevo neutrón dando lugar a un protón y un electrón (véase la figura 2, donde el neutrino producido por la desintegración del neutrón superior es absorbido por el neutrón inferior). Esto implica que antineutrino y neutrino son la misma partícula. Así pues, el proceso global sería el resultado de una primera desintegración beta normal seguida por un proceso de captura electrónica. Nótese que el número leptónico no se conserva. Las implicaciones de la imagen de Majorana para el modelo estándar y para la propia descripción de la asimetría entre materia y antimateria son esenciales. Esto explica la intensa actividad teórica y experimental que existe en la actualidad en la búsqueda y análisis de la desintegración doble beta sin neutrinos. Hasta el momento no existen datos concluyentes.

FIG. 1



En el proceso de doble desintegración beta con emisión de antineutrinos, dos neutrones se transforman en protones con la emisión de dos electrones y dos antineutrinos.

FIG. 2



En el proceso de doble desintegración beta sin la emisión de neutrinos, el antineutrino producido por la desintegración del neutrón superior es absorbido por el neutrón inferior.

Si usted puede medir algo con suficiente precisión, tiene una posibilidad de descubrir algo importante. La historia de la astronomía demuestra que muy probablemente lo que usted descubra no será lo que estaba buscando. La suerte ayuda.

RAY DAVIS Y JOHN BAHCALL

La integración beta. En concreto, se analiza el decaimiento beta del *tritio* (el isótopo más pesado del hidrógeno) en helio con la emisión de un electrón y un antineutrino. El proceso se expresa de la forma: ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$ (figura 2). Las masas del tritio y helio son muy bien conocidas, y la diferencia entre ambas nos da información sobre la energía asociada al electrón y al antineutrino. Midiendo con gran precisión el valor máximo de la energía del electrón se podría estimar la masa del antineutrino. La gran dificultad del experimento estriba en que el número de electrones emitidos con las energías más altas es una pequeñísima fracción del número total. Así pues, se necesita una enorme precisión que permita discriminar entre electrones con energías muy próximas. Los datos más recientes se traducen en un límite superior para la masa del neutrino electrónico de 2 eV, es decir, del orden de la millonésima parte del valor de la masa del electrón. En el caso de los neutrinos muónicos y tauónicos, los valores son mucho menos precisos y sus límites máximos se estiman en 0,17 MeV para el muónico y 15-16 MeV para el tauónico. Es importante resaltar que los valores previos son límites máximos. No existen límites mínimos, y de hecho, muchas de las evidencias experimentales no descartan incluso valores nulos. Por tanto, debe mantenerse una gran cautela en los valores señalados.

Un segundo procedimiento que podría, en principio, ayudarnos a obtener información adicional sobre las masas de los neutrinos es el propio fenómeno de las oscilaciones. El problema real es que la probabilidad de oscilación no puede proporcionar información sobre la masa de cada uno de los tipos de neutrinos. Por el contrario, solo depende de la diferencia entre los cuadrados de las masas. La información obtenida de los numerosos experimentos de oscilaciones indica que la diferencia entre las masas al cuadrado de los distintos neutrinos es muy pequeña,

del orden de $\sim 3 \cdot 10^{-8} \text{ eV}^2$. Aunque la escala precisa de las masas de los neutrinos no pueda determinarse a partir del fenómeno de las oscilaciones, este proceso solo es posible si, al menos, algunos tipos de neutrinos poseen masa no nula. Probablemente, todos ellos tengan masa aunque sus valores sean ínfimos en comparación con la del mismo electrón. Existen en la actualidad numerosos experimentos, tanto de medidas de oscilaciones como de estudios de desintegración beta, cuyo objetivo básico es determinar con gran precisión las masas de los distintos tipos de neutrinos.

MIRANDO EN LOS CONFINES DEL UNIVERSO

Los neutrinos procedentes de la supernova SN 1987A detectados de modo inesperado por IMB y Kamiokande supusieron el inicio de una nueva fase en el estudio de los neutrinos. ¿Sería posible explorar los confines del universo haciendo uso de telescopios de neutrinos? Las expectativas eran muy esperanzadoras. Los neutrinos pueden desplazarse por el vasto espacio interestelar sin sufrir apenas interacciones. Si pudiesen capturarse se dispondría de una fuente directa de información sobre los lugares más lejanos del universo y sobre su pasado más remoto. ¿Sería posible en algún caso capturar neutrinos producidos en los primeros instantes del Big Bang, es decir, neutrinos que llevarán viajando por el universo miles de millones de años? Esta posibilidad abriría una ventana completamente nueva a la física. Los neutrinos no solo nos habían mostrado sus extrañas propiedades, sino que ahora podían convertirse en los auténticos mensajeros del universo. La partícula cuya «captura» requirió un ímprobo esfuerzo por parte de los físicos se convertía en el mejor aliado para el estudio del mundo que nos rodea.

Los violentos fenómenos que se han ido produciendo a lo largo de la evolución del universo han generado billones de billones de neutrinos con energías altísimas, órdenes de magnitud mayores que las correspondientes a los neutrinos solares y atmosféricos. Aunque la probabilidad de interacción del neutrino aumenta

Esquema simplificado y acotado del ANTARES, con doce columnas y una auxiliar. Los módulos ópticos se agrupan en conjuntos de tres, instalados a lo largo de cada columna. Cada módulo consta de un fotomultiplicador, sensores y electrónica complementaria, todo ello dentro de una esfera de vidrio resistente a la presión del agua. Las boyas sumergidas mantienen las columnas tensadas.

Conjunto de tres módulos ópticos

Columna

Boya

Anclaje y electrónica varía

El submarino francés *Nautilus*, para eventuales labores de inspección

con su energía, es decir, resulta más fácil su captura, el flujo de neutrinos extragalácticos es tan pequeño que la única opción para «observarlos» es mediante el uso de enormes detectores mucho más grandes que los descritos en capítulos previos. No es suficiente con construir grandes tanques que se entierran en minas a diversas profundidades. La captura de los neutrinos ultra-energéticos requiere el desarrollo de una nueva concepción de los detectores. La extensión espacial de los mismos debe ser tal que la única forma de proceder es haciendo uso de las propias fuentes naturales que nos proporciona la Tierra.

En la actualidad existen varios experimentos en funcionamiento: ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss Environmental RESearch), el referido abreviadamente como BAIKAL y el IceCube. Los dos primeros están en el hemisferio norte, y en ambos casos se usa agua del mar o de lagos como medio material para llevar a cabo la detección de los neutrinos. ANTARES está en el mar Mediterráneo, a unos 40 km de la costa francesa. El proyecto consta de 12 columnas ancladas al fondo marino, a unos 2500 m de profundidad, cada una de ellas conteniendo 75 fotomultiplicadores que recogen las señales producidas por el efecto Cherenkov (véase la imagen de la página contigua). El proyecto BAIKAL, situado en el lago del mismo nombre, en Rusia, tiene una estructura similar.

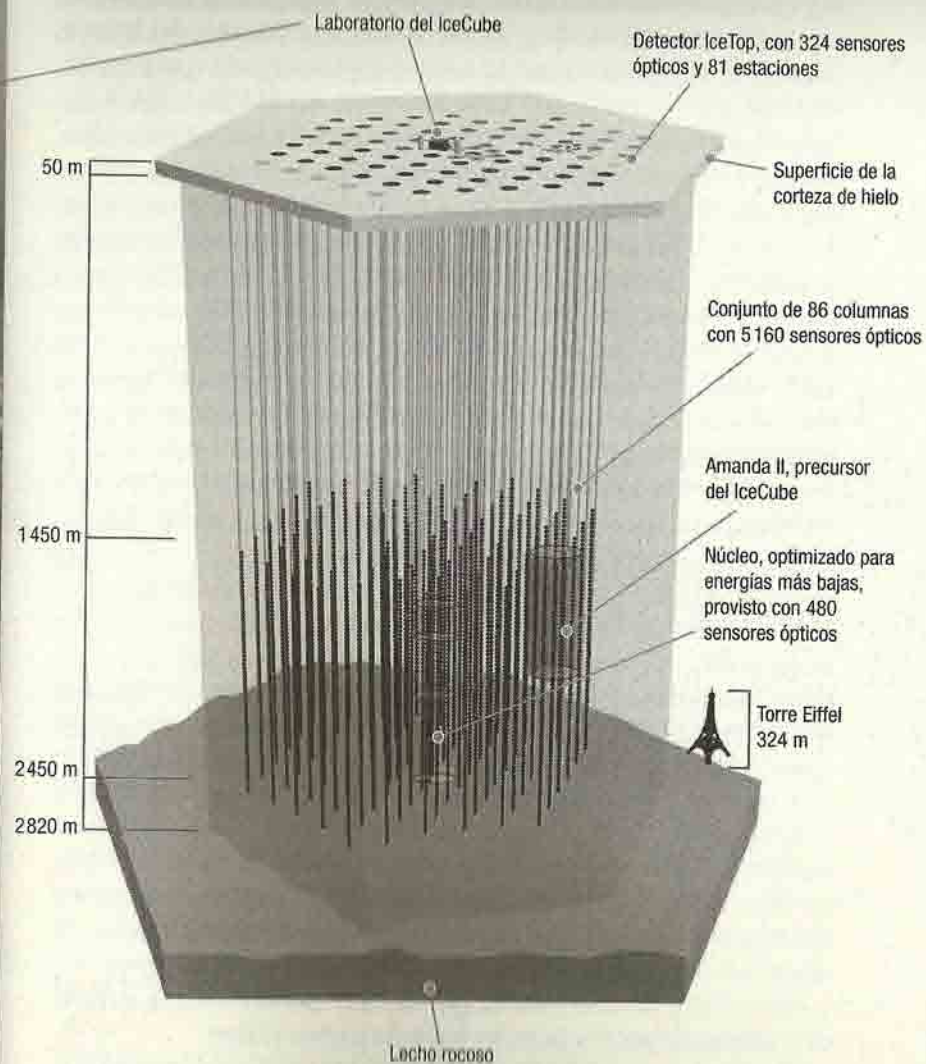
El mayor detector existente en la actualidad corresponde al proyecto IceCube, en el que participan unos 300 investigadores de 45 instituciones y centros de investigación en 12 países. IceCube está situado en la Antártida y, al contrario de los dos proyectos previos, el proceso de detección de neutrinos está basado en el uso de hielo. A un kilómetro de profundidad la presión es tan enorme que el hielo no presenta ninguna burbuja de aire, convirtiéndose en un material ideal para detectar las señales luminosas producidas tras la interacción de los neutrinos. El proyecto IceCube ocupa un volumen de 1 km^3 y está constituido por 86 columnas situadas a una profundidad de entre 1450 y 2450 m que contienen 5160 fotomultiplicadores (en las págs. 142-143 se muestra una recreación del proyecto y una fotografía del laboratorio, situado en la superficie). IceCube dispone todos

COMO UN ICEBERG

El laboratorio del IceCube, situado en la parte superior del complejo, constituye una mínima parte del detector de partículas más grande del mundo, que abarca un kilómetro cúbico de hielo. La misión del IceCube es localizar neutrinos procedentes de los sucesos astrofísicos más violentos, como explosiones de estrellas, estallidos de rayos gamma y otros fenómenos relacionados con los agujeros negros y las estrellas de neutrones.

BAJO EL HIELO

La ilustración recrea la parte del experimento IceCube que se esconde bajo el hielo de la Antártida. Para poner de manifiesto el orden de magnitud de los detectores se muestra como referencia la torre Eiffel.



sus detectores apuntando hacia abajo. La razón es eliminar al máximo los muones producidos por los rayos cósmicos usando el propio planeta como filtro. Así pues, el objetivo de IceCube es producir un mapa del flujo de neutrinos procedentes del hemisferio norte. Esta información será complementaria a la proporcionada por los otros dos experimentos, ANTARES y BAIKAL, que detectan neutrinos del hemisferio sur. En los últimos años IceCube ha permitido identificar casi 400 sucesos de los cuales algo más de 100 corresponden a neutrinos de energía superior a 10 TeV (1 TeV corresponde a un millón de MeV, aproximadamente dos millones de veces la masa del electrón). En nueve casos los neutrinos detectados presentaron energías superiores a los 100 TeV, y de ellos se identificaron tres señales de más de 1 000 millones de MeV. El telescopio IceCube es una ventana abierta a regiones hasta ahora completamente «ignotas» para el ser humano. Permitirá explorar los procesos astrofísicos más violentos, aquellos asociados al propio origen de nuestro universo.

MUCHO POR HACER

Finaliza aquí un viaje de algo más de ochenta años. Un viaje que comenzó con una simple idea, un remedio desesperado de un físico teórico que intentaba mantener a toda costa el principio de conservación de la energía, y que ha terminado con una nueva ventana abierta, quizá la más amplia que jamás hemos tenido, al universo. Durante todos estos años, el neutrino, nuestro protagonista, siempre se mostró extremadamente esquivo, reticente a mostrar sus propiedades, su naturaleza. Fue necesario que los físicos hiciesen uso de todas sus capacidades, de su imaginación, y sobre todo, de una infinita paciencia y perseverancia, para ir descubriendo poco a poco su extraña personalidad.

El neutrino escondía ferozmente sus secretos, y cada vez que los físicos conseguían abrir una puerta y mirar en su interior, se encontraban con otras dos más cerradas a cal y canto. ¿Qué escondían? El neutrino se convirtió en un gran desafío, un reto

que no parecía tener fin y que consumió la vida entera de algunos investigadores. Cuando se creía haber capturado su esencia, el neutrino mostraba una vez más su sorprendente personalidad dejando perplejos a quienes iban tras él. Fue una lucha sin cuartel, un ímprobo trabajo por el que algunos fueron recompensados y otros no.

Indudablemente, en todos estos años hemos aprendido mucho sobre nuestro esquivo protagonista. De una simple e improbable idea pasamos a su captura en el laboratorio. Descubrimos su múltiple y variada personalidad, comprobando además su capacidad de transformación como si de un camaleón se tratase. Costó mucho tiempo y necesitamos un enorme esfuerzo, pero conseguimos al final que el neutrino nos ayudase a entender cómo funciona el Sol, cómo se produce una supernova. En estos momentos estamos comenzando a explorar los confines del universo con el telescopio más potente jamás imaginado, el telescopio de neutrinos.

Nadie puede dudar del gran avance en el conocimiento que hemos conseguido en estos años, y sin embargo, el neutrino sigue provocándonos una y otra vez. No deja de ser paradójico que al mismo tiempo que exploramos el universo entero con los neutrinos, estos sigan «ocultándonos» su naturaleza más íntima: ¿qué masas tienen? ¿Neutrino y antineutrino son la misma partícula? Han pasado más de ochenta años. Aún transcurrirán algunos (o muchos) más en los que el neutrino seguirá sorprendiéndonos y, sobre todo, desafiándonos.

- CLOSE, F., *Neutrino. La partícula fantasma*, Barcelona, RBA Libros, 2012.
- HOOFT, G., *Partículas elementales*, Barcelona, Drakontos, 2008.
- PASTOR, S., *¿Qué sabemos de? Los neutrinos*, Madrid, CSIC Catarata, 2014.
- PENROSE, R., *El camino a la realidad*, Madrid, Debate, 2006.
- SÁNCHEZ, J.L. Y CASSINELLO A., *La realidad cuántica*, Barcelona, Crítica, 2012.
- YNDURÁIN, F.J., *Electrones, neutrinos y quarks*, Barcelona, Crítica, 2011.
- : *Teorías unificadas y constituyentes fundamentales de la materia*, Madrid, Instituto de España, Espasa Calpe, 1988.

- Anaxágoras 64, 65
 antimateria 136
 antineutrinos 11, 13, 47, 55, 57, 58-60, 75, 89, 91, 94-96, 99, 108, 123, 127, 128, 130, 134-138, 145
 antipartículas 43, 44, 57, 86, 94, 96, 99
 argón 52, 54, 55, 75, 79, 80, 106

 Bahcall, John 12, 78-80, 82, 85, 99, 103-105, 107, 110, 120, 122, 125, 138
 Becquerel, Henri 20, 21, 25
 Bethe, Hans 48, 49, 51, 58, 60, 70, 72-76
 Bohr, Niels 26, 27, 36, 38, 39, 44
 Broglie, Louis de 23

 cadena pp (protón-protón) 71-73, 75-77, 104, 105
 Chadwick, James 31, 34, 36, 38, 43
 Cherenkov, radiación/efecto 106, 108, 109, 111, 120, 121, 141

 ciclo
 CNO 70-72, 75
 pp *véase* cadena p-p
 cloro, detección mediante 52, 54, 55, 58, 59, 75, 76, 78-81, 104, 106
 Cowan, Clyde 10, 56, 58, 59, 60, 74
 cuántica de campos, teoría 25, 90
 Curie, Marie y Pierre 25, 28, 29, 43

 Davis, Ray 12, 54-61, 63, 74-76, 78-82, 85, 99, 103-105, 107, 112, 117, 120, 122, 138
 desintegración, ley de la 32
 desintegración (decaimiento) beta
 9, 15, 17, 31, 34, 35, 36, 37, 38, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 50, 57, 76, 89, 90, 91, 93, 94, 136, 139
 inversa 58
 doble 136, 137
 proceso doble beta *véase* doble desintegración beta
 (*véase también* estadística de los núcleos)

detector de neutrinos
 extragalácticos 123, 130, 132-134, 141
 ANTARES 140, 141, 144
 BAIKAL 141, 144
 IceCube 141-144
 deuterio 71-73, 77, 121
 Dirac, Paul 34, 43, 45, 57, 86, 136
 dualidad onda-corpúsculo 23, 112

 efecto fotoeléctrico 23, 24
 Einstein, Albert 22, 24, 25, 30, 66
 electrodébil, teoría 92
 electrón, descubrimiento del 21, 26, 29
 equivalencia masa-energía 22, 30, 66
 energía
 principio de conservación de la 15, 36, 41, 144
 producción en el Sol de 64-73
 espectro energético de electrones 36, 44
 espín 10, 26, 31, 34, 35, 37, 38, 45, 50, 88, 95
 estadística de los núcleos 34, 36-38
 estrella de neutrones 133, 134
 estructura fina, constante de 26
 exclusión, principio de 37
 experimentos, neutrinos
 detectores de galio 104, 106
 K2K 127, 128
 MiniBooNE 128
 MINOS 128
 OPERA 128-130
 SNO 120-123
 T2K 111, 128

 Fermi, Enrico 9, 38, 39, 44-46, 48, 49, 51, 53, 56, 88
 teoría de 44-46, 48, 50-52, 89, 90, 92
 Fermilab 99, 128
 fusión nuclear 48, 49, 53, 68, 69
 fluorescencia 19
 fosforescencia 20
 fotomultiplicadores 58, 106, 110, 111, 114, 120, 140, 141
 fusión nuclear 66-73, 76

 GALLEX, experimento 104, 105, 107
 Goldhaber, Maurice 79, 93
 Gran Nube de Magallanes 130, 131
 Gran Sasso, Italia 105, 128, 129

 Heisenberg, Werner 45
 helio 29, 30, 66, 67, 69-73, 76, 77, 135, 138
 Homestake, detector de la mina de 79, 81

 interacción débil 89-91, 93-95, 99, 113, 118, 135, 136

 Joliot-Curie 43, 45, 53

 Kamiokande 105-108, 120, 126, 132, 133, 139
 Kelvin, lord 18, 19, 65, 66

 Lee, T.D. 10, 90
 ligadura, energía de 68, 69

 modelo
 cuántico del átomo 26
 estándar 11, 53, 85, 100, 105, 116, 135, 136
 Mottelson, Ben 79
 muon, desintegración del 87-89, 94-96, 108

neutrinos
 atmosféricos 108, 110, 112, 117, 120, 126, 128, 132, 139
 descubrimiento de los 51, 56, 59, 60
 estados de polarización de los 89, 93, 95, 135, 136
 extragalácticos 123, 130-134, 141
 masa de los 9, 12, 13, 39, 44, 57, 88, 113, 116-119, 125-127, 134-136, 138, 139, 145
 oscilaciones de los 12, 53, 116-120, 123, 125-130, 134, 138, 139
 sabores de los (electrónico, muónico, tauónico) 11, 12, 47, 50, 59, 71, 73, 77, 91, 96-100, 108, 110-113, 116-122, 125, 126, 128, 133-135, 138
 solares 11, 12, 53, 56, 74, 75, 78-82, 85, 101, 104, 105, 108, 110, 112, 116, 117, 120-122, 126-128, 132, 133, 139
 telescopios de 126, 139, 144, 145
 neutrón 29, 30, 37, 38, 43-47, 50, 52, 53, 57-59, 68, 71-73, 76, 86, 89, 91, 104, 111, 121, 133, 134, 136, 137, 142
 descubrimiento del 38, 43

 núcleo atómico 26, 28, 30, 35, 37, 38, 43, 45, 46, 68

 paridad, violación de la 11, 90-95
 Pauli, Wolfgang 9-11, 15, 34, 36-39, 44, 45, 48, 51, 60, 74, 88
 postulado del neutrino de 10, 35, 36, 44, 60, 88
 teoría del espín de 26, 31, 37, 38

 pion, desintegración del 87, 93-95, 98, 100
 Planck, Max 18, 24
 constante de 23, 26
 Pontecorvo, Bruno 48, 49, 52-57, 60, 74, 75, 82, 88, 94, 96-98, 103, 112, 113, 116-118, 125
 positrón 43-47, 50, 57-59, 67, 70-73, 76, 77, 86, 89, 99

 radiación cósmica 55, 76, 86, 108
 radiactividad 8, 17, 21, 25, 26, 28, 30, 36, 43, 65, 66
 alfa, beta, gamma 30, 46, 66, 69
 descubrimiento de la 8, 21, 25, 28, 43
 rayos X 20, 28, 132
 Reines, Fred 10, 56, 58-60, 74
 relatividad, teoría de la 19, 22, 24-26, 30, 130, 134
 Röntgen, Wilhelm 19, 20
 Rutherford, Ernest 26-30, 32, 34, 65, 66
 modelo atómico de 26

 Schwartz, Mel 97, 98, 100
 semidesintegración, periodo de 32, 52, 65
 Steinberger, Jack 88, 93, 98, 100
 Superkamiokande 107, 110, 111, 114, 120, 121, 127, 130
 supernovas 130-134, 139, 145

 Thomson, Joseph J. 21, 26, 29
 Thomson, William *véase* Kelvin, lord

 Yang, C.N. 10, 90

Los neutrinos

Los neutrinos no tienen ninguna o poquísima masa y son neutros eléctricamente. Se trata de una combinación de propiedades literalmente imparable, ya que reaccionan tan poco con otras partículas o campos que nada detiene ni desvía su curso a través del cosmos. De hecho, en el tiempo que tarda alguien en leer este texto miles de billones de neutrinos han atravesado su cuerpo. El estudio de estas elusivas partículas nos conduce de las grandes revoluciones de la física moderna hasta las más importantes cuestiones abiertas de la ciencia actual.

Juan Antonio Caballero es catedrático de física atómica, molecular y nuclear en la Universidad de Sevilla.